



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO



**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM
ANTROPOSSOLO DECAPÍTICO COM APLICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA
TRATADA**

EMANOEL LIMA MARTINS

AREIA – PB
MAIO DE 2017

EMANOEL LIMA MARTINS

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE
UM ANTROPOSSOLO DECAPÍTICO COM APLICAÇÃO DE ÁGUA
RESIDUÁRIA TRATADA**

**AREIA – PB
MAIO DE 2017**

EMANOEL LIMA MARTINS

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE
UM ANTROPOSSOLO DECAPÍTICO COM APLICAÇÃO DE ÁGUA
RESIDUÁRIA TRATADA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Hernan Salcedo PhD

Co-orientadora: Prof^ª Dr^ª Vânia da Silva Fraga

AREIA – PB

MAIO DE 2017

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M386v Martins, Emanuel Lima.

Variabilidade Espacial de Atributos Físicos e Químicos de um Antropossolo Decápico com Aplicação de Água Residuária Tratada / Emanuel Lima Martins. - João Pessoa, 2018.
82 f. : il.

Orientação: Ignacio Hernan Salcedo.
Coorientação: Vânia da Silva Fraga.
Tese (Doutorado) - UFPB/CCA.

1. degradação do solo. 2. estoque de nutriente. 3. reuso de água. I. Salcedo, Ignacio Hernan. II. Fraga, Vânia da Silva. III. Título.

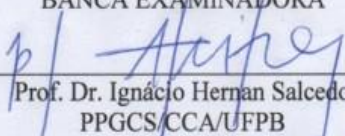
UFPB/CCA-AREIA

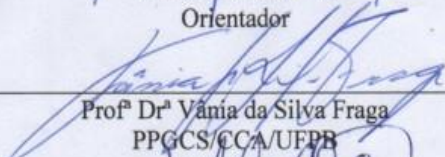
EMANOEL LIMA MARTINS


**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE
UM ANTROPOSSOLO DECAPÍTICO COM APLICAÇÃO DE ÁGUA
RESIDUÁRIA TRATADA**

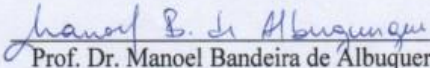
Aprovada em 26/05/2017

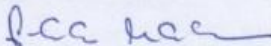
BANCA EXAMINADORA

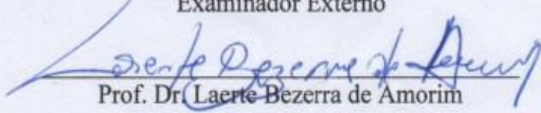

Prof. Dr. Ignácio Hernan Salcedo
PPGCS/CCA/UFPB
Orientador


Prof. Drª Vânia da Silva Fraga
PPGCS/CCA/UFPB
Orientadora


Prof. Dr. Walter Esfrain Pereira
PPGCS/CCA/UFPB
Examinador Interno


Prof. Dr. Manoel Bandeira de Albuquerque
PPGCS/CCA/UFPB
Examinador Interno


Dr. Salomão de Sousa Medeiros
MCTIC/INSA
Examinador Externo


Prof. Dr. Laerte Bezerra de Amorim
IFPI
Examinador Externo

Ao orientador e amigo
Prof. Ignacio Salcedo (*in*
memoriam), **Dedico**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ignácio Salcedo (*in memoriam*), pela orientação e ensinamentos, fundamentais não apenas para o desenvolvimento deste trabalho, como também para minha vida pessoal e profissional.

A Prof^a Vania, por sua orientação e seus ensinamentos fundamentais para minha formação acadêmica e para a conclusão deste trabalho.

Ao Instituto Nacional do Semiárido, na pessoa do Diretor e Pesquisador Dr. Salomão Medeiros pela concessão da área experimental e por todo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

À Esther Lucena, por sua companhia, dedicação e seu apoio em todos os momentos.

À minha família, em especial a minha mãe Josefa por todo seu esforço e dedicação para que eu pudesse estudar e atingir meus objetivos, e por tudo que representa em minha vida. Ao meu pai Antônio e irmãos Francisco (*In memoriam*) Regina e João Batista, minha cunhada Luzivânia e meus sobrinhos Raquel, Ismael e Sara por todo suporte e carinho.

A minha segunda família Esther, Josélia, Joanderson, Míriam, Erida, e os demais familiares por todo apoio e dedicação.

Ao pessoal do laboratório do Insa: Sayonara, Vanessa, Julia e Cristiano que muito contribuíram para o desenvolvimento das análises em laboratório.

Aos colegas e amigos do Insa: Renan, Mariana, Teresa, Silvanete e Erton, pelas conversas produtivas que muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e amigos: Prof. Bruno, Prof^a Vania, Laerte, Renato, Kaline, Vitor, André, Mariana, Jhony e demais que de alguma forma contribuíram para realização desse trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Degradação do solo em regiões semiáridas... ..	3
2.2 Variabilidade Espacial de Atributos do Solo	5
2.3 Reuso de Água na agricultura	7
2.4 Reuso de água na recuperação de áreas degradadas	9
3. CAPÍTULO I	12
RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	14
3.1 Introdução	15
3.2 Material e Métodos	17
3.2 Material e Métodos	17
3.2.1 Área de estudo.....	17
3.2.2 Amostragem de solo.....	18
3.2.3 Análise do solo.....	18
3.2.4 Análises estatísticas.....	19
3.3 Resultados e Discussão	22
3.3.1 Análise univariada.....	22
3.3.2 Análise da variabilidade espacial	24
3.3.3 Discussão dos resultados	29
3.4 Conclusão.....	32

3.5 Referências Bibliográficas	33
4. CAPÍTULO II.....	38
RESUMO.....	39
ABSTRACT.....	40
4.1 Introdução	41
4.2 Material e Métodos	43
4.2.1 Área de estudo.....	43
4.2.2 Caracterização da água residuária.....	43
4.2.3 Delineamento experimental e tratamentos	44
4.2.4 Amostragem e caracterização inicial do solo	45
4.2.5 Amostragem e caracterização final do solo	46
4.2.6 Análises estatísticas.....	46
4.3 Resultados e Discussão	47
4.3.1 Qualidade da água e aporte de nutrientes ao solo	47
4.3.2 Efeitos nos atributos químicos do solo.....	48
4.3.3 Análise de componentes principais	50
4.3.4 Análise de correlação canônica	54
4.3.5 Crescimento das espécies florestais	55
4.4 Conclusão.....	58
4.5 Referências Bibliográficas	59
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1.	Atributos químicos e físicos (n=80) de um Antropossolo Decapítico em área de empréstimo, Campina Grande, PB.....	18
Tabela 2.	Estatística descritiva de atributos do solo nas camadas 0-15 e 15-30 cm.de um Antropossolo Decapítico em região semiárida.....	22
Tabela 3.	Parâmetros e modelos ajustados aos semivariogramas dos atributos do solo.....	25
Tabela 4.	Parâmetros de validação dos modelos para pontos não amostrados.....	27
Tabela 5.	Parâmetros estatísticos de atributos químicos e físicos e número estimado de amostras necessário para detectar uma diferença de 10% nos teores de atributos do solo em um Antropossolo Decapítico em região semiárida.....	28
Tabela 6.	Estoques de matéria orgânica (MOS) e P Mehlich-1 (PM1) em um Antropossolo, calculados utilizando densidades que incluem (Ds) ou não (Dco) o peso da fração grosseira.....	28

CAPÍTULO II

Tabela 1.	Atributos químicos de um Atropossolo Decapítico em área de empréstimo em região semiárida.....	45
Tabela 2.	Caracterização granulométrica e textural em um Atropossolo Decapítico em área de empréstimo em região semiárida.....	45
Tabela 3.	Caracterização da água residuária utilizada na irrigação da área experimental.....	47
Tabela 4.	Aporte de nutriente aplicados ao solo durante 2 anos de irrigação com água residuária em kg m^{-3}	48
Tabela 5.	Análise de variância e teste de média para atributos químicos um Antropossolo Decapítico antes e após irrigação com água residuária tratada e água de abastecimento em região semiárida.....	49
Tabela 6.	Autovetores dos componentes principais de atributos químicos de um Antropossolo Decapítico com aplicação de água residuária tratada.....	51
Tabela 7.	Teste de dimensionalidade canônica para atributos químicos e físicos do solo antes e após três anos de irrigação com água residuária tratada em uma Antropossolo Decapítico em região semiárida.....	54
Tabela 8.	Coeficientes de correlação canônica padronizados para atributos químicos e físicos do solo antes e após três anos de irrigação com água residuária tratada em uma Antropossolo Decapítico em região semiárida.....	54

Tabela 9. Análise de variância de variáveis de crescimento de espécies florestais da caatinga irrigadas com água de abastecimento e água residuária em Antropossolo Decapítico.....	58
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Mapa de relevo planialtimétrico de área experimental em um Antropossolo Decapítico.....	17
Figura 2. Correlação entre a proporção de fragmentos grosseiros (pFG) e a densidade do solo (kg dm^{-3}) nas camadas de 0 a 15 cm (A) e 15 a 30cm (B) em Antropossolo Decapítico em região semiárida.....	23
Figura 3. Distribuição espacial de atributos físicos e químicos do solo na camada de 0 - 15 cm em Antropossolo Decapítico em região semiárida.....	26

CAPÍTULO II

Figura 1. Estação de tratamento primário (facultativo) de esgoto doméstico da sede do Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, Paraíba.....	43
Figura 2. Delineamento experimental e distribuição de tratamentos em um Antropossolo Decapítico com aplicação de água residuária tratada.....	44
Figura 3. Análise de componentes principais para atributos químicos de solo com aplicação de água de abastecimento e água residuária tratada na profundidade de 0 – 15 cm (3a) e na profundidade de 15 – 30 cm (3b).....	53
Figura 3. Ordenação da análise de correlação canônica para atributos químicos e físicos do solo antes e após três anos de irrigação com água residuária tratada em uma Antropossolo Decapítico em região semiárida.....	55

MARTINS, E. L. **Variabilidade Espacial de Atributos Físicos e Químicos de um Antropossolo Decápítico com Aplicação de Água Residuária Tratada.** Areia, 2017, 70p. Tese, Programa de Pós-Graduação em ciência do Solo, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba. Orientador: Prof. Dr. Ignacio Hernan Salcedo PhD, Co-orientadora: Prof^a Dr^a. Vânia da Silva Fraga.

RESUMO

Devido ao crescente aumento das áreas em processo de degradação decorrente, em sua maioria, de influências antrópicas, faz-se necessário a utilização de alternativas, preferencialmente de baixo custo, que possibilitem o conhecimento do nível de degradação e promovam a recuperação da capacidade produtiva do solo, a fim de viabilizar um manejo adequado e a recuperação dessas áreas. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade espacial de atributos do solo e como esta interfere no estoque matéria orgânica (MOS) e fósforo (P) no solo e verificar o efeito da aplicação de água residuária tratada (AR) na recuperação dos teores de MOS e P em um Antropossolo Decápítico. Inicialmente, foi realizado georreferenciamento, definido uma malha e realizada amostragem de solo em uma área degradada com Antropossolo Decápítico, a partir da qual determinou-se os seguintes atributos: densidade do solo (D_s), densidade da terra fina (D_{tf}), proporção da fração grosseira (pFG) e os teores de MOS e P, a partir destes calculou-se a densidade corrigida (D_{co}) e os estoques de MOS e P. Influenciada pela elevada pFG , a D_s apresentou valores extremamente elevados, na ordem de $1,9 \text{ kg dm}^{-3}$. Sugerindo elevado grau de compactação do solo a D_{tf} apresentou valores em torno de $1,7 \text{ kg dm}^{-3}$. Por outro lado, a D_{co} apresentou-se em torno de $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$. Todos os atributos físicos apresentaram elevada variabilidade espacial e dependência espacial forte, enquanto os teores de MOS e P, em torno de 3 g kg^{-1} e 2 mg kg^{-1} respectivamente, apresentaram variabilidade espacial elevada e dependência espacial fraca. A estimativa do estoque de MOS e P apenas com base na D_s , superestimou o estoque de MOS e P disponíveis no solo em relação ao mesmo cálculo com base na D_{co} , considerando a massa e volume da pFG . Posteriormente, visando avaliar do efeito da aplicação de água residuária tratada no crescimento de espécies florestais e na recuperação de atributos químicos do solo, foi implantado um experimento em blocos casualizados com cinco espécies florestais irrigadas com três lâminas de água (7 L semana^{-1} de água de abastecimento (AA), 7 L semana^{-1} de água residuária tratada (AR_7) e de 14 L semana^{-1} de água residuária tratada (AR_{14}). Após três anos, foi realizada coleta e análise do solo quanto aos teores de P, P orgânico e MOS. E as espécies foram avaliadas quanto a altura e diâmetro à altura do peito (DAP). Ambos os tratamentos AR_7 e AR_{14} promoveram aumento expressivo dos teores de MOS, P e P orgânico no solo em relação ao tratamento AA, atingindo ordens de magnitude de 5 a 8 vezes superior a este. Entretanto, não houve diferença significativa na altura e diâmetro das espécies florestais entre os tratamentos, provavelmente devido a fatores fitossociológicos inerente as espécies utilizadas. Portanto, a AR pode ser tida como uma excelente alternativa de baixo custo para a recuperação de solos degradados em região semiárida.

Palavras- chave: degradação do solo, estoque de nutrientes, reuso de água.

MARTINS, E. L. **Spatial Variability of Physical and Chemical Attributes in a Decapitated Anthroposol with of Treated Wastewater Irrigation.** Areia, 2017, 70p. Thesis, Programa de Pós-Graduação em ciência do Solo, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba. Adviser: Prof. Dr. Ignacio Hernan Salcedo PhD, Co-Adviser: Prof^a. Dr^a. Vânia da Silva Fraga.

ABSTRACT

Due to the increase of degraded areas, due mainly to anthropic influences, to use alternatives, low cost preferably is necessary, that allow the knowledge the level of degradation and promote the recovery of the soil productive capacity, in order to enable adequate management and recovery of these areas. In this sense, the objective of this study was to evaluate the spatial variability of soil attributes and how it interferes with phosphorus (P) and soil organic matter (SOM) as to verify the effect of treated wastewater (WW), P and SOM contents in a Decapitated Anthroposol. Initially, a georeferencing was performed, a grid was defined and soil sampling was performed in a degraded area with Decapitated Anthroposol, from which the soil bulk density (BDs), the fine earth bulk density (BDfe), the proportion of the coarse fraction (pCF) and the contents of P and SOM, from these the corrected density (BDco) and P and SOM stocks were calculated. Influenced by the high pCF, the BDs presented extremely high values, in the order of 1.9 kg dm^{-3} . By suggesting a high soil compaction degree BDfe presented values around 1.7 kg dm^{-3} . On the other hand, the BDco was around 1.3 kg dm^{-3} . All physical attributes presented high spatial variability and strong spatial dependence, while P and SOM contents around 3 g kg^{-1} and 2 mg kg^{-1} respectively showed high spatial variability and weak spatial dependence. The estimate of the P and SOM stock based only on BDs, disregarding the mass and volume of the pCF overestimated the available P and SOM stock in the soil in relation to the same calculation based on the BDco, discounting the pCF. Later, in order to evaluate the effect of the application of treated wastewater on the growth of forest species and the recovery of soil chemical attributes, a randomized block experiment with five forest species irrigated with three water slides (7 L week^{-1} of (AR₇) and 14 L week^{-1} of treated wastewater (AR₁₄). After three years, the soil was collected and analyzed for P, Organic P and SOM, and the species were evaluated for height and diameter at breast height (DBH). Reaching orders of magnitude 5 to 8 times higher than AA treatment, both AR₇ and AR₁₄ treatments promoted an expressive increase in the levels of P, organic P and SOM. However, there was no significant difference in the height and diameter of the forest species among the treatments, probably due to phytosociological factors inherent to the species used. Therefore, RA can be considered as an excellent low cost alternative for the recovery of degraded soils in the semi-arid region.

Keywords: Soil degradation, nutrient stocks, water reuse.

1. INTRODUÇÃO

O aumento na intensidade de uso do solo promove a redução e perda de sua qualidade causando degradação, que aliado à escassez de água e nutrientes no solo em regiões áridas e semiáridas, é uma das principais causas do processo de desertificação. Este processo, é assim denominado por provocar mudanças na paisagem assemelhando-se aos desertos, embora não necessariamente essas áreas possam ser consideradas como tais (SOARES et al, 2016).

A degradação do solo constitui um problema grave para a manutenção da sua capacidade produtiva e incide sobre 33% da superfície terrestre, atingindo cerca de 2,6 bilhões de pessoas, em torno de 42% da população mundial. Apenas na América Latina, mais de 516 milhões de hectares são afetados pelo processo de desertificação. Estima-se uma perda de 24 bilhões de ton ha^{-1} de solo da camada arável, afetando negativamente a produção agrícola e o desenvolvimento sustentável (FAO, 1998)

Os principais fatores de degradação do solo estão associados a ações antrópicas, como o desmatamento, as queimadas, mineração, a agropecuária intensiva e a remoção de solo para a construção civil. Dessa forma, os solos antropogênicos são a classe em maior expansão no mundo (CURCIO et al, 2004). Nesses solos, a capacidade produtiva é fortemente reduzida pela alteração das características físicas, químicas e biológicas, em decorrência da remoção da cobertura vegetal e camadas superficiais (DOETTERL et al, 2016).

O aumento da densidade do solo é uma característica inerente às áreas degradadas, provocado pela redução da macroporosidade, gerando camadas muito adensadas. Considerado um bom indicador de degradação física, a compactação afeta negativamente a qualidade do solo e o crescimento das plantas, reduz a infiltração e transporte de água e ar no solo (REINERT et al, 2008; BRANDÃO et al., 2006). Aliado a isso, o aumento da proporção de fragmentos de grosseiros como cascalho e calhaus reduz efetivamente o volume disponível para armazenamento de água e desenvolvimento de raízes (NAGARAJA; SRINIVASAMURTHY, 2009).

A recuperação da capacidade produtiva do solo demanda tempo e elevado custo econômico, e ainda tem a escassez de água como principal agravante na região semiárida, aliado ao alto custo de fertilizantes, tonando economicamente inviável a produção agrícola em áreas degradadas. A utilização de água proveniente de estações de tratamento de esgoto doméstico (ETE) tem se mostrado uma prática promissora para a recuperação da

capacidade produtiva do solo tanto na produção florestal ou de forragem quanto na recuperação de solos degradados (BECERRA-CASTRO et al, 2015; BONINI et al, 2015). Várias publicações de órgãos internacionais destacam o interesse mundial no tema de reutilização de águas residuárias. A FAO e a UNEP-WHO têm publicado manuais com diversas técnicas para a reutilização correta de água residuárias (MONTE; ALBUQUERQUE; 2010; MATEO-SAGASTA et al., 2013) assim como, com considerações de ordem econômico (WINPENNY et al., 2010).

Para a recuperação de áreas degradadas na região semiárida, a possibilidade de recuperar os teores de MOS e de realizar aportes de N, P e K para viabilizar a produção de biomassa, apresenta-se como uma alternativa estratégica. Algumas pesquisas têm avaliado o transporte de solutos de águas residuárias em diversas classes de solos, (MEDEIROS et al., 2005; ANAMI et al., 2008; CARVALHO et al., 2013). Os principais efeitos ao solo destacados foram o aumento dos teores de C, N, P, K, Ca, Mg, atividade microbiana, salinidade e dispersão de argilas (FONSECA et al., 2007). Entretanto os efeitos nas propriedades físicas e químicas do solo com o uso de águas residuárias, são manifestados após sucessivos anos de aplicação e depende de fatores como clima e características do solo e composição da água residuária (ERTHAL et al, 2010).

O reuso de águas apresenta, naturalmente desafios técnicos, legais, econômicos e sociais, já que há riscos à saúde humana, pelo risco de introdução de contaminantes no solo (MIZYED, 2016). Entretanto, em se tratando de áreas degradadas que perderam sua capacidade produtiva, o gerenciamento do risco de contaminação precisa levar em consideração os benefícios à segurança alimentar, nutricional e econômicas que essa fonte hídrica oferece, sobretudo em regiões áridas e semiáridas (DICKIN et al., 2016). Além do aspecto hídrico, a água residuária apresenta também conteúdos variáveis de sólidos em suspensão, matéria orgânica e nutrientes.

Dessa forma, o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo, pode fornecer informações determinantes para definição do manejo a ser adotado para a recuperação da capacidade produtiva do solo em áreas degradadas. Nesse sentido esse trabalho teve como objetivo, avaliar a variabilidade espacial de atributos do solo e como esta interfere no estoque matéria orgânica (MOS) e fósforo no solo (P) e verificar o efeito da aplicação de água residuária tratada no crescimento de espécies florestais e na recuperação dos teores de MOS e P no solo e em um Antropossolo Decápico em região semiárida.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Degradação do solo em regiões semiáridas

O conceito de degradação do solo se refere a perda da capacidade produtiva dos solos decorrente de fatores naturais e antrópicos (ARAUJO et al, 2012). Esse processo se constitui um problema de ordem mundial para a manutenção da função do solo, incidem sobre 33% da superfície terrestre, atingindo cerca de 2,6 bilhões de pessoas, em torno de 42% da população mundial. Apenas na América Latina, mais de 516 milhões de hectares são afetados pelo processo de desertificação. Estima-se uma perda de 24 bilhões de ton ha⁻¹ de solo da camada arável, afetando negativamente a produção agrícola e o desenvolvimento sustentável (FAO, 1998)

Os principais fatores de degradação do solo estão associados a ações antrópicas, como o desmatamento, as queimadas, mineração, a agropecuária intensiva e a remoção de solo para a construção civil. Dessa forma, os solos antropogênicos são a classe em maior expansão no mundo (CURCIO et al, 2004). Nesses solos, a capacidade produtiva é fortemente reduzida pela alteração das características físicas, químicas e biológicas, em decorrência da remoção da cobertura vegetal e camadas superficiais (DOETTERL et al, 2016). Aliado à escassez de água e nutrientes no solo em regiões áridas e semiáridas, a degradação é uma das principais causas do processo de desertificação, que provoca mudanças na paisagem assemelhando-se aos desertos (SOARES et al, 2016).

Desde de que foi introduzido o termo desertificação no Brasil por Vasconcelos Sobrinho (1971), diversos estudos foram publicados sobre o tema. Sampaio et al, (2005) dividiu esses trabalhos em quatro grupos. O primeiro grupo, incluindo as apresentações do Seminário sobre Desertificação no Nordeste (SEMA 1986), tratou apenas de identificar áreas desertificadas ou em processo de desertificação, posteriormente foram direcionados a definição e estudo dos núcleos de desertificação reconhecidos pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA s/d 2; IBGE 2004).

O segundo grupo de trabalhos tem discutido o conceito de desertificação e seus possíveis indicadores. Nesse grupo, os principais trabalhos destacados foram os de Rodrigues et al. (1995), que definiram indicadores de degradação e assim como Ferreira et al. (1994), usados depois pelo Ministério do Meio Ambiente para mapear a susceptibilidade e a ocorrência da desertificação no Brasil (MMA s/d). Em seguida, Matallo Junior (2001) e Sampaio et al. (2003) propuseram o estabelecimento de índices de

susceptibilidade e de desertificação, com base na progressão de etapas do processo: 1) redução na cobertura vegetal; 2) degradação ambiental; 3) deterioração da agricultura; 4) declínio econômico; e 5) complicações sociais.

Um terceiro grupo de trabalhos tem tratado de características da desertificação nos núcleos ou em outras áreas específicas. Dele fazem parte os trabalhos de Leite et al. (2003), mapeando a desertificação no Ceará, com base em estimativa da cobertura vegetal, vista por satélite, incluindo, no segundo caso, também observações da erosão. Assim como Galvão (1994) e Sales (1996). Além destes, um quarto grupo se referiram nominalmente à desertificação, há uma vasta literatura sobre secas e seus efeitos e sobre diferentes formas de degradação das terras no semiárido Nordeste, que não relacionaram seus temas à desertificação, embora a ligação possa ser feita. A maior parte dos trabalhos sobre secas tratou da queda na produção agrícola e das suas consequências econômicas e sociais (DUARTE, 2002), deixando de lado a degradação ambiental.

Mais recentemente, muitos trabalhos têm focado no uso de alternativas para recuperação de áreas degradadas. Ferreira et al (2016), destacou a importância da adubação verde na recuperação de áreas degradadas. Em estudo de recuperação de área degradada pela mineração, Nascimento et al (2015) verificou lenta revegetação natural após longos períodos de encerramento da exploração, destacando a necessidade de alternativas efetivas e de baixo custo. Todos esses trabalhos colaboram com busca de soluções que atendam as demandas de recuperação de áreas degradadas a fim de mitigar seus efeitos à população e atingir os objetivos da Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos das Secas (UNCCD).

O Brasil, juntamente com 192 países, é signatário da UNCCD desde de sua criação em 1992. A partir desse compromisso foram estabelecidos padrões de trabalho e metas internacionais convergentes em ações coordenadas na busca de soluções qualitativas que atendam às demandas socioambientais nos espaços áridos, semiáridos e subúmidos secos, particularmente onde residem as populações mais pobres do planeta. A prevenção e o combate a esta degradação e suas consequências são o objeto da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação, nos países afetados por seca grave e/ou desertificação, particularmente na África (MMA, s/d).

Apesar de signatário, pouca atenção tem sido despendida para solucionar esse problema, com uma política inconsistente desde a assinatura da Convenção. Sampaio et al (2005) destacaram também a pouca contribuição da sociedade civil, com mobilização mais

ativa em alguns dos núcleos de desertificação e campanhas esporádicas na mídia, muitas vezes com distorção grave de conceitos.

2.2 Variabilidade Espacial de Atributos do Solo

O conhecimento da natureza da variabilidade espacial dos atributos do solo é essencial para a avaliação dos efeitos dos atributos do solo no desenvolvimento das plantas (NEGREIROS NETO et al., 2014). Pelo fato do solo apresentar naturalmente, grande heterogeneidade em seus atributos a médias e longas distâncias, podendo ou não, apresentar forte dependência espacial (SEPASKHA et al, 2005), o que é indispensável para a definição de estratégias eficazes de manejo do solo (SCHAFFRATH et al., 2008).

Entretanto, em muitos estudos o efeito da variabilidade espacial sobre a representatividade dos valores médios é ignorada (CHAVES; FARIAS, 2009). Campos et al. (2008), destaca que uma adequada descrição da dependência espacial é fundamental para revelar tanto o grau de continuidade espacial de um atributo quanto a sua estrutura de variação. E estas variáveis são influenciadas por diversas características do ambiente, dentre elas, os fatores de formação do solo e o manejo ao qual a área foi submetida (CORÁ; BERALDO, 2006).

A verificação de existência de dependência espacial dos atributos do solo pode ser realizada por meio ferramentas como a geoestatística através de modelos ajustados de semivariogramas, que descrevem a estrutura de dependência espacial do fenômeno estudado, apresentando muitas informações no seu conjunto gráfico. Entretanto, essa abundância de detalhamento gráfico, pode suscitar a necessidade de uma rápida e única medida da dependência espacial, dessa forma utilizam-se índices de dependência espacial (SEIDEL et al, 2014).

Dentre eles, o mais utilizado é IDE, índice proposto por Cambardella et al (1994) que assim como Biondi et al. (1994) apresentaram uma medida de dependência espacial que relaciona o parâmetro contribuição com o parâmetro patamar. Em Cambardella et al. (1994), também foi sugerida uma medida que relaciona o parâmetro efeito pepita com o parâmetro patamar. Seidel et al (2014) propôs um novo índice para medir a dependência espacial, levando em consideração todos os aspectos do semivariograma e comparou com os índices já existentes, concluindo que estes poderiam levar a equívocos na interpretação do grau de dependência espacial, recomendando então, seu novo índice. Segundo Biondi et

al. (1994), esses índices são úteis para fazer comparações entre diferentes cenários de dependências espaciais.

De maneira geral, para que possa ser realizada a análise geoestatística os modelos de semivariogramas devem atender a hipótese de estacionariedade de segunda ordem, sendo avaliados os seguintes parâmetros do modelo: contribuição, efeito pepita, patamar e alcance (SEIDEL et al, 2014). Intuitivamente, se o modelo de semivariograma possui inclinação próxima de zero, então o patamar é igual ao efeito pepita e, portanto, a variável é descrita como espacialmente independente e completamente aleatória. Desse modo, uma medida que relaciona efeito pepita e patamar realmente tem condições de caracterizar em alguma medida a dependência espacial de um atributo. De forma semelhante, a comparação entre a contribuição e o patamar também permite gerar uma medida relativa da dependência espacial.

Tendo em vista que o manejo da fertilidade do solo na agricultura baseia-se nos teores médios dos nutrientes no solo e que a análise química do solo expressa um único resultado por área, desconsiderar a presença da variabilidade e considerando que todas as propriedades do solo são semelhantes dentro da camada amostrada é um equívoco que pode acarretar grandes prejuízos (PONTELLI, 2006). O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo torna-se fundamental para otimizar as aplicações localizadas de corretivos e fertilizantes e reduzir a degradação ambiental provocada pelo excesso destes, melhorando dessa maneira o controle do sistema de produção das culturas (SOUZA et al., 2007; SILVA et al., 2007).

Andrade et al (2015) destacou a importância de avaliar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo em razão dos atributos do solo e, em especial de a densidade não ser homogênea e apresentar dependência espacial, a variabilidade causa problemas em experimentação de campo, especialmente no manejo da irrigação. Por essa razão, a caracterização da variabilidade espacial é essencial para um entendimento melhor das interações entre atributos do solo e manejo de irrigação (FILHO et al, 2001),

A variabilidade espacial dos teores de nutrientes no solo pode não ser igual entre si, ou seja, alguns nutrientes necessitam de número maior de amostras que outros, para que se possa descrever o seu comportamento numa determinada área. A variabilidade do solo é

uma consequência de complexas interações dos fatores e processos de sua formação, sendo influenciada pelas práticas de manejo (FILHO, 2009).

Outro aspecto de avaliar a variabilidade espacial é a definição correta da malha de amostragem. Cherubin et al (2015) avaliaram a precisão na caracterização da variabilidade espacial de P e K disponíveis no solo, por meio de diferentes dimensões de malhas amostrais e a similaridade dos mapas temáticos gerados e concluíram que a redução da dimensão da malha amostral aumenta a precisão na caracterização da variabilidade espacial de P e K por meio de mapas temáticos. Os mapas de fertilidade do solo tornam-se mais dissimilares à medida que aumenta a dimensão de malha amostral, e esses desvios são mais significativos para o P do que para o K.

2.3 Reuso de água na agricultura

A água é um recurso natural imprescindível à existência e manutenção dos ecossistemas terrestres. Estima-se em cerca de 1,35 milhões de quilômetros cúbicos o volume total de água em nosso planeta, distribuídos nos oceanos, geleiras, lençol freático, rios, lagos e na atmosfera (RAMOS, 2007). Apesar disso, segundo Borghetti et al (2004), somente 0,007% do volume total de água do planeta está disponível para uso imediato da população, o que até pouco tempo era considerado um recurso infinito tem, aliado à crescente demanda pelo recurso, preocupado especialistas e autoridades no assunto, pelo evidente decréscimo da disponibilidade de água limpa em todo o planeta.

A utilização de água pela população gera grande quantidade de águas residuárias (AR), as quais são lançadas diretamente nos recursos hídricos, levando a um processo de contaminação e diminuição da disponibilidade dos recursos hídricos, bem como a deterioração da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, levantando a necessidade de um aproveitamento racional desse recurso, com o mínimo de dano ao meio ambiente (BORGHETTI et al, 2004),

Em função da escassez de água que em várias regiões, o reuso de água proveniente de esgotos domésticos tem se tornado uma alternativa potencial de racionalização e reutilização da água para vários usos, inclusive a irrigação agrícola, que representa aproximadamente 70% do consumo hídrico no mundo (CHRISTOFIDIS, 2001). Dessa forma, vários são os benefícios da água residuária proveniente de tratamento de esgotos na agricultura, podendo-se mencionar a possibilidade de substituição parcial de fertilizantes

químicos, com a diminuição do impacto ambiental, em função da redução da contaminação dos cursos d'água; um significativo aumento na produção, tanto qualitativo quanto quantitativo; além da economia da quantidade de água direcionada para a irrigação, que pode ser utilizada para fins mais nobres, como o abastecimento público.

A prática de reuso de água na agricultura ainda garante a recarga do lençol freático, fertirrigação de culturas, bem como auxilia na dessedentação de animais de acordo com Brega Filho & Mancuso (2002). A utilização de água proveniente de reuso é diferenciada para irrigação de plantas não comestíveis (silvicultura, pastagens, fibras e sementes) e comestíveis (nas formas cruas e cozidas), necessitando essas de um nível maior de qualidade. Porém, conforme Beekman (1996), grandes volumes de águas servidas podem ser utilizadas em categorias de reuso, como agricultura irrigada e recarga de aquíferos, devendo-se atentar para suas limitações sanitárias e ambientais de aplicação. Assim, a técnica de reuso tende a ser um eficiente instrumento para a gestão dos recursos hídricos no Brasil.

Diversos autores têm retratado o aumento do uso de água residuária, visto que proporciona o uso mais eficiente dos recursos hídricos com consequente redução de volume gasto via abastecimento. (MOJIRI e AMIROSSADAT 2011; VEDACHALAM e MANCL 2012). Sua utilização na agricultura irrigada é ampla em diversos países, a exemplo de Israel, país que transformou o reuso de água em política nacional em 1955 e atualmente reutiliza mais 80% dos efluentes de esgotos domésticos tratados para irrigação (MEHNERT et al, 2016). O uso desses efluentes na agricultura tem como principal vantagem a redução no uso de insumos como água e fertilizante conforme citam Pereira et al., (2011) que observaram um aumento de macro e micronutrientes no solo irrigado com água residuária de esgoto doméstico. Outro benefício com a utilização da irrigação com água residuária é o ambiental, ocasionado pela diminuição da captação de águas subterrâneas e a redução de descarga de efluentes diretamente nos corpos hídricos (MUYEN et al., 2011)

Em regiões áridas e semiáridas, a escassez de água é cada vez mais comum, principalmente em áreas rurais onde existe pouca infraestrutura de abastecimento. Nos países em desenvolvimento como é o caso de algumas regiões do Brasil, essa problemática é maior, portanto a utilização de água residuária de esgoto doméstico, utilizada via irrigação para produção de culturas prioritárias, apresenta-se como uma opção de grande

potencialidade ao incremento da produção agrícola na agricultura do semiárido brasileiro (VEDACHALAM e MANCL 2012).

O uso de efluentes de esgoto doméstico não tratado pode ter sérias consequências negativas para o solo, entretanto quando tratados, e feito o devido acompanhamento das condições do solo e do efluente, estes podem proporcionar diversos benefícios ao solo. Segundo Ferreira et, al. (2011) a fertirrigação com água proveniente de esgotos domésticos tratados é adequada para reutilização na agricultura, reduzindo seu risco de poluição. Na aplicação de águas residuais domésticas em solo cultivado com café, a água residuária foi eficiente no fornecimento de alguns nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, tais como N, P, K, Ca, Mg e S, diminuindo o Al tendo assim reduções nas doses recomendadas de fertilizantes e calagem (FERREIRA et, al, 2011).

2.4 Reuso de água na recuperação de áreas degradadas

O reuso de água proveniente de estações de tratamento de esgoto doméstico tem se mostrado uma prática promissora para recuperação de áreas degradadas em região semiárida. De acordo com Rodrigues et al (2009), a AR apresenta diversas vantagens para o meio ambiente, gerando economia de água e fertilizantes, dessa forma configurando-se como uma alternativa bastante promissora para regiões áridas e semiáridas. Uma vez que promove o reuso sustentável da água proporcionando o aproveitamento dos nutrientes presentes como N e P, considerados grandes poluentes de cursos de água, entretanto essenciais às plantas e de baixa solubilidade e disponibilidade em solos intemperizados, o que torna a prática do reuso de água uma fonte de baixo custo desse nutriente para solos degradados (KLEIN; AGNE, 2012).

A utilização de lodo de esgoto para a recuperação de áreas degradadas já se mostrou uma prática promissora segundo Sampaio et al. (2012), proporcionando aumento nos agregados do solo conforme o aumento das doses de lodo, assim como a porosidade do solo que também aumenta até 12 meses após a aplicação. Quanto a umidade do solo, os autores relatam que ocorre um aumento da umidade do solo em função do aumento das doses de lodo no solo até seis meses após a aplicação. Após 18 meses da aplicação do lodo de esgoto, não houve mais diferenças entre os tratamentos na estabilidade de agregados. Os resultados indicam que após esse período deve ter ocorrido mineralização da matéria orgânica (MO) presente no lodo de esgoto, não permitindo, assim, seu efeito benéfico nessa característica física por mais tempo.

Bonini et al. (2013) em estudo com adubação verde e lodo de esgoto para recuperar a fertilidade de um Latossolo degradado concluíram que o lodo de esgoto melhora características químicas do solo degradado, e podem reduzir ou mesmo excluir a utilização de adubo mineral, mas recomenda a aplicação de cal no lodo para corrigir o seu pH, sendo possível uso sem acidificar o solo, já a adubação verde não é eficaz na melhoria do solo no primeiro ano de estudo. Por outro lado, em solos degradados pela construção de obras civis, adição de adubação mineral e orgânica teve comportamento semelhante para a recuperação de atributos físico-hídricos e o teor de matéria orgânica, o lodo de esgoto foi mais promissor na camada superficial do solo, sendo considerado viável na recuperação de suas propriedades físico-hídricas (CAMPOS, et al. 2011).

De acordo com Usman et al. (2012) o uso de lodo de esgoto na agricultura é vantajoso, no entanto, antes da sua utilização na agricultura o lodo deve ser submetido a uma avaliação e testes para determinar as propriedades físico-químicas, conteúdo de poluentes ou bactérias patogênicas e também ecotoxicológicas, a fim de evitar o risco de ameaças potenciais para o ambiente e para a saúde humana.

No caso do uso de aplicação da água residuária observa-se mais efeitos positivos nas características químicas do solo, sendo que estes efeitos são regulados de acordo com a composição físico-química da água (sólidos dissolvidos, presença de íons tóxicos e concentração relativa de sódio), as condições climáticas e o tipo de solo. Neste contexto, alguns estudos reforçam a relevância da irrigação com o esgoto doméstico no fornecimento de parte dos nutrientes essenciais para as plantas como N, P, e K (HESPANHOL, 2002; KOURA et al., 2002), e para melhorar algumas propriedades físicas do solo (ALMEIDA & SILVA, 2006).

Ao comparar culturas irrigadas com água de abastecimento e adubadas com NPK, com culturas irrigadas com efluentes domésticos tratados, Sousa et. al. (2005) obtiveram produtividade de 15 a 30% superior àquelas culturas irrigadas com água de abastecimento e adubadas com NPK, o que pode comprovar a viabilidade do uso da água residuária tratada na irrigação. Grande parte dos autores relacionam o aumento de determinadas variáveis químicas do solo, e que influenciam na produção das plantas, e consequentemente, nos diferentes potenciais nutricionais dos efluentes.

A aplicação de água residuária doméstica eleva significativamente a concentração de nitrogênio no solo (SANTOS et al., 2006). O nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) ocorrem

naturalmente em solos e águas, como produtos da mineralização do material orgânico. Entretanto, grandes concentrações desses íons podem ocorrer, quando há lançamento de material orgânico, ou então, aplicação excessiva de fertilizantes nitrogenados no solo, o que pode causar riscos à saúde da população (MUCHOVEJ & RECHIGL, 1994).

Em relação à qualidade do solo, mesmo com as vantagens da aplicação da água residuária é necessário evitar que ocorra o processo de salinização do solo, pois a irrigação é muitas vezes, a única possibilidade de garantir a produção agrícola, principalmente em regiões como o semiárido nordestino (FERREIRA NETO et al., 2010). Portanto, o conhecimento das características físicas e químicas do solo em que será aplicada a água residuária é fundamental para que não se altere a integridade dos recursos hídricos nem tampouco sature o solo com um único elemento que pode levar ao desequilíbrio nutricional das plantas (MATOS, 2005).

Para mitigar os impactos ambientais da aplicação da água residuária tratada, a disposição no solo, é considerada uma das alternativas mais viáveis (BEBÉ et al., 2010). Essa afirmação baseia-se no fato de que parte da água residuária se infiltra no solo, ocorrendo o tratamento do efluente, pois o solo comporta-se como uma camada filtrante, possibilitando ações de adsorção e atividades dos microrganismos, os quais usam a matéria orgânica contida na água como fonte de energia (COURACCI FILHO et al., 1999).

CAPÍTULO I

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO E ESTOQUE DE MATERIA ORGÂNICA E FÓSFORO EM SOLO DEGRADADO

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO E ESTOQUE DE MATÉRIA ORGÂNICA E FÓSFORO EM SOLO DEGRADADO

RESUMO

Com o objetivo de avaliar a heterogeneidade na distribuição espacial da fração grosseira e como esta afeta a distribuição da densidade do solo e das concentrações de fósforo extraível e matéria orgânica em duas profundidades de um Antropossolo Decápítico e calcular os estoques de matéria orgânica e fósforo, foi definido uma malha e coletadas e analisadas 80 amostras de solo quanto aos atributos: densidade do solo (D_s), densidade da terra fina (D_{tf}) e a densidade corrigida (D_{co}), bem como os teores de matéria orgânica do solo e fósforo extraível. Influenciada pela fração grosseira a D_s apresentou valores extremamente elevados nas duas profundidades, na ordem de $1,9 \text{ kg dm}^{-3}$. Sugerindo elevado grau de compactação do solo a D_{tf} apresentou valores em torno de $1,7 \text{ kg dm}^{-3}$ enquanto que a D_{co} apresentou valores em torno de $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$, essas variáveis assim como a fração grosseira apresentaram elevada variabilidade espacial e forte dependência espacial. Os teores de MOS e P, que apresentaram valores extremamente baixos da ordem de 3 g kg^{-1} e 2 mg kg^{-1} respectivamente, apresentaram variabilidade espacial elevada e dependência espacial fraca. A estimativa do estoque de nutrientes em solos sem considerar a massa e volume da fração grosseira superestimou os valores reais de nutrientes disponíveis no solo em relação ao mesmo cálculo quando se considerou essa fração.

Palavras-chave: variabilidade espacial, densidade do solo, pedregosidade, estoque de nutrientes.

SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES, SOIL ORGANIC MATTER AND PHOSPHORUS STOCK IN DEGRADED SOIL

ABSTRACT

In order to evaluate the spatial distribution of the coarse fraction and how it affects the distribution of soil density, phosphorus and organic matter concentrations in two depths of a Decapitic Anthrosol and to calculate the organic matter and phosphorus stocks, was defined a grid then 80 soil samples was collected and analyzed for the attributes: Soil bulk density (BD), fine earth bulk density (Dfe) and corrected density (Dco), as well as soil organic matter and extractable phosphorus. Influenced by the coarse fraction, BD presented extremely high values at two evaluated depths, such $1,9 \text{ kg dm}^{-3}$. Suggesting a high soil compaction degree o Dtf presented values around $1,7 \text{ kg dm}^{-3}$ while Dco was around $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$, These variables as well as the coarse fraction presented high spatial variability and strong spatial dependence. The SOM and P levels, which presented extremely low values, respectively 3 g kg^{-1} e 2 mg kg^{-1} , Presented high spatial variability and weak spatial dependence. The estimate of nutrient stock in soils without considering the mass and volume of the coarse fraction overestimated the actual nutrient values available in the soil in relation to the same calculation when this fraction was considered.

Keywords: spatial variability, soil bulkdensity, rock fragments, nutrient stock.

3. 1 INTRODUÇÃO

Os solos antropogênicos constituem a classe em maior expansão no mundo devido ao crescimento dos centros urbanos e suas periferias, atividade de mineração e as áreas de empréstimo para retirada de material para uso na construção civil (MARTZIRIS et al, 2016; ZHANG et al, 2005; HILLER, 2000). Essa retirada se traduz numa redução imediata da qualidade do solo devido a remoção de horizontes superficiais e exposição de camadas subjacentes ou, até mesmo, o próprio regolito (KRUPSKI et al, 2017).

A capacidade produtiva do solo é fortemente diminuída pela alteração das características físicas, químicas e biológicas do solo, em decorrência da remoção da cobertura vegetal nas áreas de empréstimo (DOETTERL et al, 2016). A compactação do solo é outra característica inerente a essas áreas. Considerado um bom indicador de degradação física, por afetar negativamente a qualidade do solo e o crescimento das plantas, a compactação reduz a infiltração e transporte de água e ar no solo, o que dificulta muito o desenvolvimento do sistema radicular (REINERT et al, 2008; BRANDÃO et al., 2006).

A remoção das camadas superficiais de solos degradados ou que naturalmente apresentem pedregosidade em sua composição por serem solos jovens, desenvolvidos em embasamento cristalino, como Neossolos e alguns Luvisolos e Planossolos, aumenta a proporção de cascalho e calhaus (SSDS, 1993). O aumento dessa fração reduz efetivamente o volume disponível para armazenamento de água e desenvolvimento de raízes (NAGARAJA; SRINIVASAMURTHY, 2009).

A heterogeneidade na distribuição da fração grosseira (fração > 2mm) no solo faz pressupor uma variabilidade da densidade do solo também elevada, o que afeta a distribuição de nutrientes e matéria orgânica (MOS) no solo. Considerado um dos atributos mais sensíveis ao manejo do solo, a MOS tem grande importância para as propriedades físicas do solo, melhorando sua estrutura e capacidade de infiltração e retenção de água, além de servir como fonte de nutrientes e carbono para os microrganismos do solo. E é juntamente com o fósforo, um dos atributos químicos mais limitantes para a produtividade na região semiárida devido aos baixos teores encontrados no solo (SALCEDO; SAMPAIO, 2008).

Em solos sem fração grosseira tem se constatado que a densidade do solo apresenta dependência espacial (CRUZ et al., 2010). No caso de solos degradados esperam-se variações na densidade do solo ainda mais intensas, devido a retirada seletiva de material e

a compactação do solo. Consequentemente, essas variações na densidade afetarão também o cálculo do estoque de nutrientes e MOS, atualmente obtidos a partir da análise da fração fina (fração <2 mm).

Portanto, o volume ocupado pela fração grosseira não deve ser ignorado (VAN WESEMAEL et al., 2000). Uma vez que a massa ou estoque de nutrientes totais ou potencialmente disponíveis em um volume de referência (V_{ref}), na fração fina do solo diminui com o aumento na proporção da fração grosseira (HAMARASHID et al., 2010). Dessa forma, os resultados das análises de rotina de fertilidade podem indicar teores de nutrientes superestimados por estar calculando o estoque apenas com base no volume de terra fina, desprezando o volume da fração grosseira, que afeta a densidade do solo levando a recomendações errôneas de nutrientes na adubação de solos com pedregosidade.

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivos: i) avaliar a heterogeneidade na distribuição da fração grosseira e como esta afeta a distribuição espacial da densidade do solo e das concentrações de fósforo extraível e matéria orgânica em duas profundidades de um Antropossolo Decápico. ii) calcular os estoques de matéria orgânica e fósforo extraível considerando a fração grosseira e o número de amostras necessárias para estimar os valores médios dessas variáveis com um desvio de 10% e intervalo de confiança de 95%.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de estudo

A pesquisa foi conduzida em área experimental localizada nas imediações da sede do Instituto Nacional do Semiárido (INSA) em Campina Grande, PB, ($7^{\circ}15'11''\text{S}$ a $7^{\circ}15'13''\text{S}$ e $35^{\circ}56'49''\text{W}$ a $35^{\circ}56'51''\text{W}$). A região é caracterizada por um clima quente e úmido com regime pluviométrico irregular e longo período de estiagem classificado como As' de acordo com a classificação de Köppen (1918). A temperatura do ar varia entre a máxima anual de $28,6^{\circ}\text{C}$ e a mínima $19,5^{\circ}\text{C}$ e a umidade relativa com média em torno de 80%.

O relevo da área de estudo é suave ondulado e o solo anteriormente correspondente a um Planossolo Nátrico (BRASIL, 1972) com histórico de utilização como área de empréstimo para remoção de solo, classificado como Antropossolo Decapítico (CURCIO et al, 2004).

A área experimental tem dimensões de 60 x 60 m e foi previamente mapeada utilizando *sistema de posicionamento global* (GPS) para a vetorização e detalhamento do relevo. A partir deste, foi definido o grid para amostragem do solo, correspondente a uma malha irregular com espaçamentos de 6 x 6 m e 6 x 9 m (Figura 1). Dessa forma, foram então definidos 80 pontos amostrais, nos quais foram retiradas amostras de solo nas camadas de 0-15 e 15-30 cm.

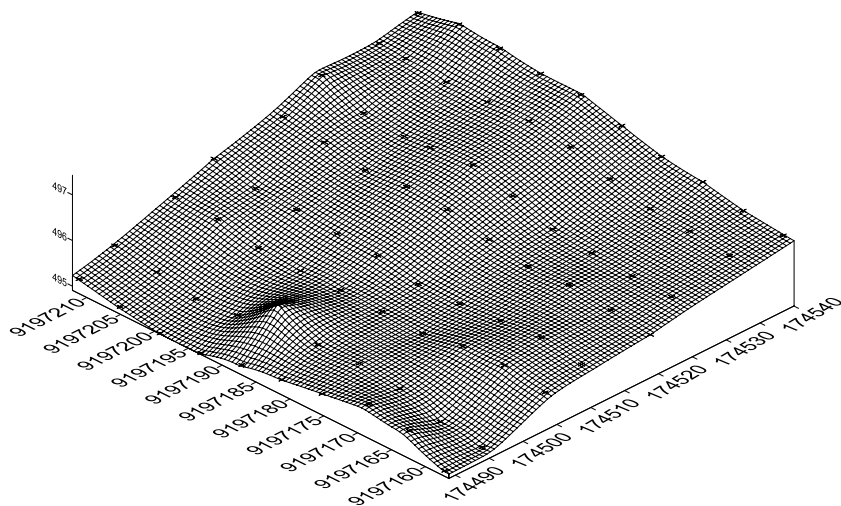


Figura 1. Mapa de relevo planialtimétrico de área experimental em um Antropossolo Decapítico.

3.2.2 Amostragem de solo

A amostragem de solo foi realizada com o auxílio de um cavador, por se tratar de uma área com muita pedregosidade. Cada ponto foi escavado até a profundidade definida, coletando-se todo o material (terra fina, cascalho e calhaus) em um saco plástico. O volume ocupado pela amostra foi determinado de acordo com os procedimentos descritos por Kohl (1988), no qual foi inserido um saco plástico no interior da cavidade, em seguida preenchido com água e posteriormente medindo o volume da água em proveta graduada. O material coletado foi seco e pesado em balança e em seguida foi peneirado para separação e pesagem da fração grosseira (fração > 2mm) correspondente a cascalho e calhaus e a fração fina (fração < 2mm), respectivamente de acordo com metodologia da Embrapa (DONAGEMA, 2011).

3.2.3 Análise do solo

As amostras de terra fina (TFSA) foram analisadas quanto ao pH em água (DONAGEMA, 2011), matéria orgânica do solo (MOS) pelo método de ignição em mufla a 550 °C (SCHULTE et al, 1987), P extraível por Mehlich-1 e determinação colorimétrica (MURPHY; RILEY 1962), granulometria pelo método do densímetro, separando-se as frações areia, silte e argila (DONAGEMA, 2011).

Tabela 1. Atributos químicos e físicos (n=80) de um Antropossolo Decápico em área de empréstimo, Campina Grande, PB.

Prof.	pH	P	MOS	Areia	Silte	Argila	Classe
cm		mg kg ⁻¹		g kg ⁻¹			
0 – 15	5,9	2,33	3,01	716	150	134	Franco arenoso
15 – 30	6,0	0,65	3,12	707	146	147	Franco arenoso

P, fósforo Mehlich-1; MO, matéria orgânica.

A densidade do solo (Ds) foi calculada dividindo-se o peso total do solo seco, incluindo fragmentos grosseiros, pelo volume total ocupado pelo solo coletado:

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_s} \quad (1)$$

Sendo Mss, a massa do solo seco (kg) e Vs, o volume do solo (dm³)

A densidade da terra fina (D_{tf}) (fração < 2mm) foi calculada de acordo com

Andraski (1991):

$$D_{tf} = \frac{D_s(1 - g_r)}{1 - v_r} \quad (2)$$

Sendo g_r a proporção de fragmentos grosseiros (cascalho e calhaus) que foi calculado dividindo-se o peso de fragmentos grosseiros pelo peso total da amostra, e v_r , o conteúdo volumétrico de fragmentos grosseiros, calculado pela seguinte equação:

$$v_r = D_s \frac{g_r}{D_{fg}} \quad (3)$$

Sendo D_{fg} a densidade dos fragmentos rochosos, assumindo-se o valor de 2,65 kg dm⁻³ (PAGE-DUMROESE et al, 1999).

A densidade corrigida (D_{co}) foi uma variável definida calculada dividindo-se a massa de terra fina (TFSA) após remoção dos fragmentos grosseiros, pelo volume total do solo, valor este utilizado para a conversão das concentrações de MOS e P em base mássica de TFSA para estoque por área para cada camada.

$$D_{co} = \frac{M_{tf}}{v_{tf}} \quad (4)$$

Os estoques (E_N) de MOS (g kg⁻¹) e P (mg ha⁻¹) em cada profundidade foram calculados multiplicando-se o teor de MOS e de P na amostra pela densidade (kg dm⁻¹) de cada camada, multiplicado pela espessura da camada amostrada (cm). Para comparar os estoques entre massas iguais de solo, foram feitas correções pela massa de solo equivalente (ELLERT; BETTANY, 1995).

$$E_N = \frac{(N \cdot D_s \cdot e)}{10} \quad (5)$$

Em que N é o teor da variável avaliada, D_s , a densidade do solo, e e , a espessura da camada amostrada.

Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise estatística descritiva, na qual foram determinados a média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e teste de normalidade. Foi utilizado o *PROC UNIVARIATE* do pacote estatístico SAS University Edition (SAS, 2016).

Para a determinação do grau de dependência espacial da Densidade do solo, da Densidade da TFSA, a Densidade corrigida, a fração grosseira, a MOS e o P-Mehlich-1, foram selecionadas 60 das 80 amostras de forma aleatória e os dados submetidos ao *PROC VARIOGRAM* para obtenção das semivariâncias utilizando o pacote estatístico SAS University Edition (SAS, 2016). Para a obtenção dos variogramas foram testados os modelos teóricos Esférico, Exponencial, Gaussiano e Matern utilizando critério de Akaike (AIC) para a escolha do melhor modelo. Em seguida feito o ajuste das semivariâncias em função da distância que separa as amostras, a partir da seguinte equação:

(6)

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Em que $\gamma(h)$ é a semivariância estimada, $N(h)$ é o número de pares de dados experimentais separados pelo vetor h ; Z representa os valores das medidas dos atributos do solo.

A partir dos parâmetros do modelo escolhido para cada variável foi calculado o Índice de Dependência Espacial (IDE) proposto por Cambardella et al. (1994). O cálculo do IDE é a relação entre o efeito pepita (C_0) e o patamar; ($C_0 + C$). A partir deste se classifica a dependência espacial em forte quando $IDE < 25$, moderada $25 < IDE < 75$ e fraca para $IDE > 75$ e é determinado pela seguinte equação:

(7)

$$IDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100$$

Os modelos foram utilizados para interpolar os dados amostrais por krigagem ordinária, mapeando-se a variabilidade espacial das variáveis estudadas. Foram utilizados 75% da base de dados para cada camada para validação dos mapas. Dessa forma, para avaliar a qualidade dos mapas gerados calculou-se o erro de predição, chamado de precisão da predição, para isso foram comparados os dados estimados $\hat{z}(\hat{y}_i)$ com as observações obtidas nos pontos de validação do grupo controle $z(y_i)$.

Para esse grupo controle foram calculados o Erro médio de predição (Equação 8), Raiz quadrática do Erro Médio Normalizado (Equação 9) e o coeficiente de Correlação (Equação 10).

Erro Médio (EM):

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(\hat{y}_i) - z(y_i)] \quad E\{EM\} = 0 \quad (8)$$

Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(z\hat{y}_i) - z(y_i)] \right)^2} \quad E\{RMSE\} = o(h=0) \quad (9)$$

Coefficiente de correlação

$$r = \frac{[cov(\hat{y}_i, z(y_i))]}{var\ z(\hat{y}_i).var\ z(y_i)} \quad E\{r\}=0 \quad (10)$$

Sendo que, n é o número de pontos de validação; \hat{y}_i são os valores estimados e y_i , os valores observados e \bar{X}_i a média dos valores observados.

Em seguida foi feito o mapeamento do desvio padrão para cada ponto amostrado. Para isso foram utilizados os pacotes “*gstat*” (GRALER et al, 2016), “*automap*” (HIEMSTRA et al, 2008) do software R.

Considerando que para a definição de manejos específicos para recuperação da área há a necessidade de comparar valores médios das variáveis de interesse antes e após a implantação dos tratamentos. Foi calculado o número de amostras necessárias devem ser retiradas da área para detectar uma diferença de 10% entre as médias com um intervalo de confiança de 95%, de acordo com a seguinte equação:

$$\hat{n} = \left(\frac{\sigma^2 t_\alpha^2}{E} \right)^2 \quad (11)$$

Em que \hat{n} é o número de amostras necessário, t_α^2 , é o valor de distribuição de t Student com $n-1$ graus de liberdade ao nível de probabilidade α (0,05 neste caso), onde n é número de amostras usado para calcular a variância das amostras, σ^2 é a variância da variável e E é o erro permitido, neste estudo definido como 10% da média das amostras de cada variável (BLYNTH; MACLEOD, 1978).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Análise univariada

A densidade do solo (Ds) apresentou valores elevados duas profundidades avaliadas, com valor médio de $1,91 \text{ kg dm}^{-3}$ e $1,96 \text{ kg dm}^{-3}$ respectivamente, para as camadas 0 – 15 e 15 – 30 cm (Tabela 2). Essa semelhança indica relação com a elevada proporção da fração grosseira (pFG), que apresentou valores equivalentes a 0,22 e 0,26 nas respectivas camadas. E a densidade de $2,68 \text{ kg dm}^{-3}$ desta fração contribui para esses valores elevados de densidade do solo.

Tabela 2. Estatística descritiva de atributos do solo nas camadas 0-15 e 15-30 cm de um Antropossolo Decápico em região semiárida.

Variável		\bar{X}	Md	Min	Max	DP	CV	p
----- Camada 0 – 15 cm -----								
Densidade do solo	kg dm^{-3}	1,97	1,96	1,48	2,25	0,17	9,12	0,09
Densidade terra fina	kg dm^{-3}	1,72	1,78	1,38	2,05	0,14	8,11	0,07
Densidade corrigida	kg dm^{-3}	1,36	1,37	1,13	1,54	0,12	9,18	0,02
pFG		0,22	0,21	0,05	0,42	0,04	47,8	0,06
MOS	g kg^{-1}	3,06	2,25	0,54	8,42	1,97	64,6	0,18
Fósforo	mg kg^{-1}	2,33	2,21	0,10	7,37	1,46	62,8	0,08
----- Camada 15 – 30 cm -----								
Densidade do solo	kg dm^{-3}	1,92	1,99	1,46	2,27	0,20	10,8	0,10
Densidade terra fina	kg dm^{-3}	1,83	1,84	1,41	2,08	0,16	9,55	0,11
Densidade corrigida	kg dm^{-3}	1,31	1,28	1,12	1,56	0,13	10,2	0,15
pFG		0,26	0,29	0,04	0,46	0,11	42,2	0,15
MOS	g kg^{-1}	3,12	2,51	0,09	9,99	2,12	68,2	0,15
Fósforo	mg kg^{-1}	0,65	0,50	0,02	3,25	0,56	86,2	0,24

\bar{X} , média; Md, mediana; min, mínimo, max, máximo; DP, desvio padrão; CV(%), coeficiente de variação; K, coeficiente de curtose; Ass, coeficiente de assimetria; p, teste de Kolmogorov-Smirnok

A densidade da terra fina (Dtf), que só considera o peso e volume da fração $<2 \text{ mm}$, também foi elevada, com valores médios de $1,72 \text{ kg dm}^{-3}$ na camada 0-15, e de $1,83 \text{ kg dm}^{-3}$ na camada de 15-30 cm (Tabela 2). O coeficiente de variação (CV) da densidade do solo e da TFSA, ficou entre 8 e 10% para as duas camadas (Tabela 2), valores de 3 a 5 vezes superiores aos encontrados em solos cultivados ou que não apresentam material grosseiro (SILVA et al, 2000, ANDRADE et al, 2015).

A densidade do solo corrigida (Dco) considerou a massa de TFSA no volume total da amostra coletada, e resultou em valores bastante inferiores à Ds e Dtf, com média de $1,35 \text{ kg dm}^{-3}$ na camada de 0-15 cm, e de $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$ na camada de 15-30 cm. Esta é a variável correta para estimar estoque de nutrientes no solo, pois é a fração que contém nutrientes em formas relativamente disponíveis.

A proporção de fragmentos grosseiros (pFG) apresentou grande amplitude de variação, com valores entre 0,05 até 0,42 na camada de 0 – 15 cm e de 0,04 até 0,46 na camada de 15 a 30 cm (Tabela 2). Mostrando correlação direta com a densidade do solo, à medida que aumenta a proporção de TFSA e diminui pFG (Figura 2).

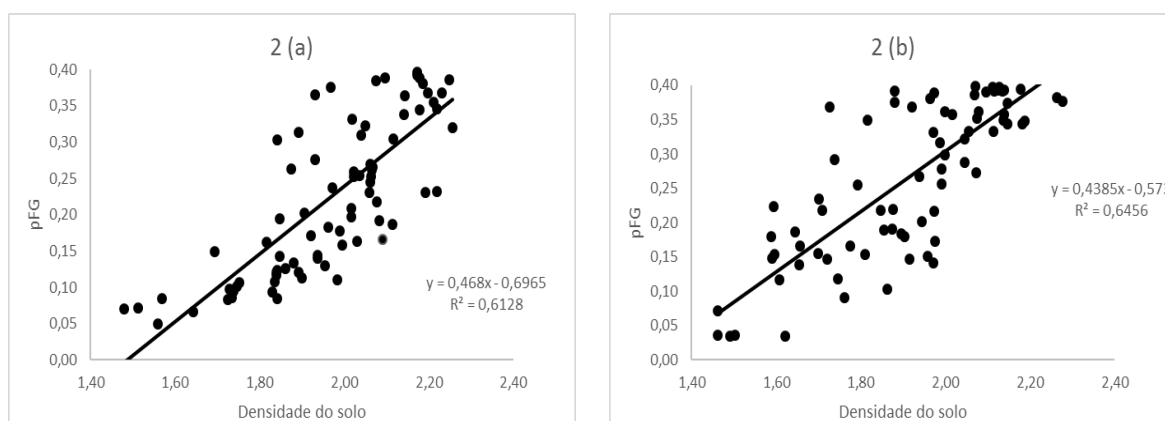


Figura 2. Correlação entre a proporção de fragmentos grosseiros (pFG) e a densidade do solo (kg dm^{-3}) nas camadas de 0 a 15 cm (A) e 15 a 30cm (B) em Antropossolo Decápico em região semiárida.

Os teores médios de matéria orgânica do solo (MOS) encontrado foram muito baixos, de $3,06 \text{ g kg}^{-1}$ e de $3,12 \text{ g kg}^{-1}$ nas camadas de 0-15 e 15-30 cm respectivamente. Da mesma forma, os teores P_{M1} , com médias de 2,33 e $0,65 \text{ mg kg}^{-1}$ nas camadas de 0-15 cm e de 15-30 cm, respectivamente são totalmente insuficientes para o fornecimento de P para as plantas.

Admitindo-se um valor crítico de $p < 0,10$, todas as variáveis na camada de 15-30 cm apresentaram desvios da distribuição normal enquanto na camada superficial somente a MOS. Essas variáveis foram transformadas para a forma logarítmica e o valor informado na tabela é da média geométrica. Entretanto, vale lembrar que o critério de normalidade não é uma condição necessária para utilizar a técnica de geoestatística, que foi aplicada nas variáveis não transformadas. (ISAAKS; SRIVASTAVA 1989).

3.3.2 Análise da variabilidade espacial

Todas as variáveis analisadas indicaram forte dependência espacial, apenas a densidade de TFSA na camada de 15-30 cm apresentou dependência espacial fraca (>75%) pelo índice de Cambardella et al. (1994). O modelo esférico foi o mais frequente entre os modelos teóricos utilizados para o ajuste dos semivariogramas experimentais (Tabela 3). Segundo Isaaks & Srivastava (1989), esse modelo é o que melhor descreve propriedades com alta continuidade espacial ou menos erráticos a curta distância. Os modelos esféricos e exponenciais apresentam-se como os modelos teóricos mais comuns para o ajuste dos atributos do solo (MONTOMIYA et al. 2011).

A matéria orgânica do solo foi a que apresentou valores superiores de alcance, de 23,90 m, para ambas as camadas. Para as demais variáveis, o alcance foi inferior a 20 m. A proporção da fração grosseira apresentou a maior diferença do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar ($C_0 + C_1$) do semivariograma, indicando uma forte dependência espacial nessas distâncias (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

Tabela 3. Parâmetros e modelos ajustados aos semivariogramas de atributos do solo físicos e químicos de um Antropossolo Decápico em região semiárida.

Variável	Unidade	Modelo	C0	C0+C1	a (m)	R ²	IDE
----- Camada 0 – 15 cm -----							
Densidade do solo	kg dm ⁻³	Esférico	0,00	0,03	15,8	0,89	Forte
Densidade terra fina	kg dm ⁻³	Esférico	0,00	0,01	19,1	0,91	Forte
Densidade corrigida	kg dm ⁻³	Exponencial	0,00	0,01	19,3	0,92	Forte
pFG		Exponencial	0,00	0,56	18,9	0,90	Forte
MOS	g kg ⁻¹	Matern	1,60	3,21	23,9	0,85	Moderado
Fósforo	mg kg ⁻¹	Esférico	0,00	1,13	18,9	0,91	Fraca
----- Camada 15 – 30 cm -----							
Densidade do solo	kg dm ⁻³	Esférico	0,02	0,04	15,8	0,91	Moderado
Densidade terra fina	kg dm ⁻³	Esférico	0,02	0,02	21,6	0,95	Fraca
Densidade corrigida	kg dm ⁻³	Gaussiano	0,00	0,01	19,3	0,93	Forte
pFG		Exponencial	0,00	0,57	17,1	0,87	Forte
MOS	g kg ⁻¹	Matern	1,61	3,73	23,9	0,82	Moderado
Fósforo	mg kg ⁻¹	Matern	0,17	0,24	19,9	0,93	Fraca

C0, efeito pepita; C0+C1, patamar; a, Alcance; R², coeficiente de correlação; IDE, Índice de dependência espacial; pFG, proporção de fração grosseira, MOS, matéria orgânica do solo.

Na distribuição espacial das propriedades físicas, predominaram na área valores de Ds entre 1,85 e 2,15 g cm⁻³, de forma relativamente coincidente com a faixa de 1,75 e 1,95 g cm⁻³ para Dtf, indicando que a maior parte da área está severamente compactada. Os fragmentos grosseiros estão distribuídos em praticamente toda a área, com valores de pFG entre 0,15 a 0,45. Nas áreas menores onde pFG superou 0,45, a correção de Ds pela massa de FG foi maior, e a Dco ficou < 1,3 g cm⁻³.

A variabilidade espacial dos teores de MOS e P_{MI} foi bastante elevada, uma vez que as escalas da Figura 3 mostram variações de pelo menos uma ordem de magnitude, e não sugerem relação entre si ou com os demais atributos.

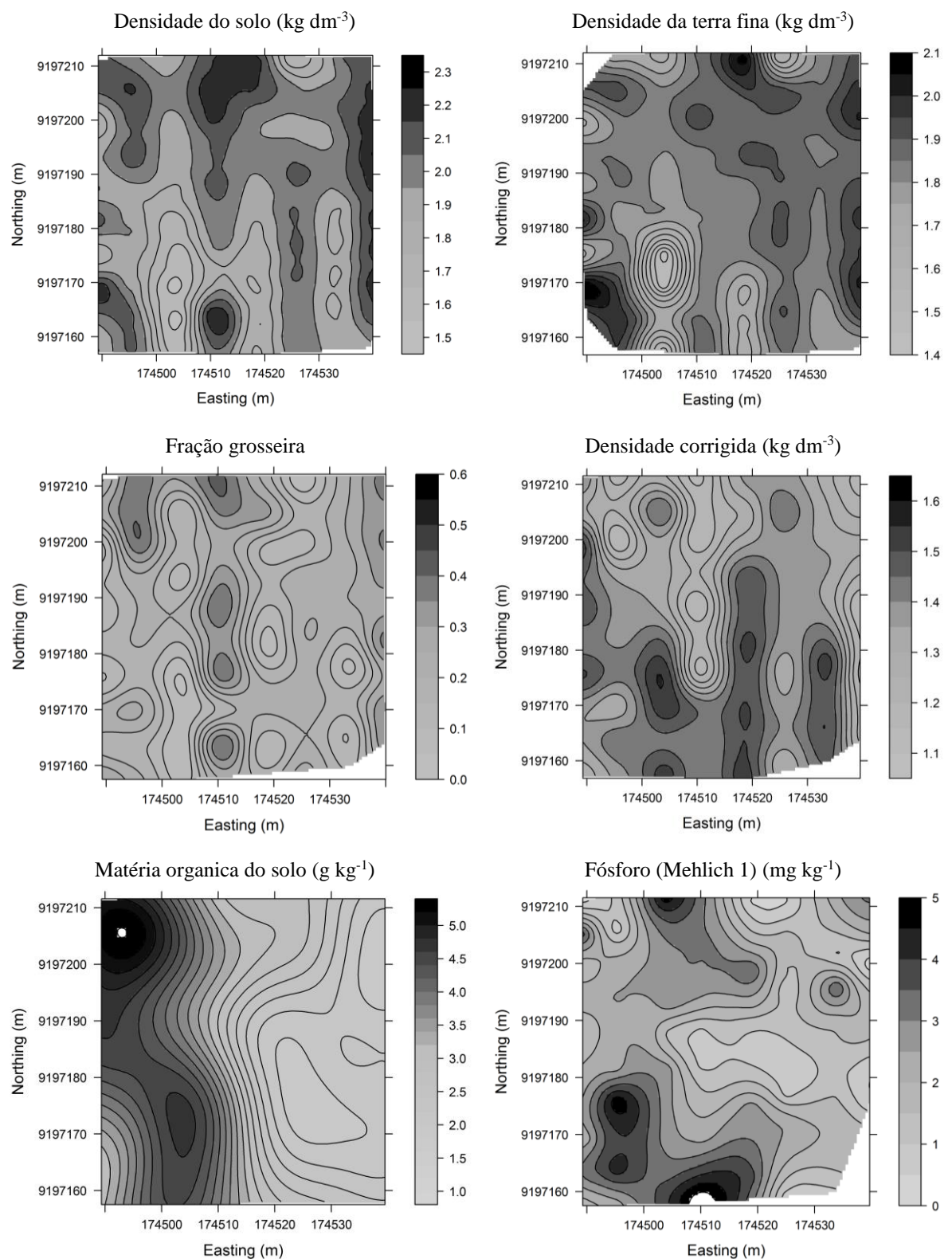


Figura 3. Distribuição espacial de atributos físicos e químicos do solo na camada de 0 – 15 cm em Antropossolo Decápico em região semiárida.

A precisão dos mapas gerados foi determinada simulando-se os valores das variáveis em 20 pontos amostrais não incluídos na base de dados dos modelos. Os erros médios (EM) das estimativas foram mínimos para as variáveis físicas (Tabela 3). Para as variáveis químicas ME foi maior, devido a variabilidade bem mais acentuada dos atributos químicos (Figura 3). Apesar disso, considerando-se que a variabilidade da MOS e P_{M1} foi de uma ordem de magnitude, as estimativas dessas variáveis apresentam desvios razoáveis. A correlação entre os valores estimados e os valores experimentais (COR, Tabela 3) manteve-se baixa, indicando a ausência de vies ou tendenciosidade nas estimativas de todas as variáveis

Tabela 4. Parâmetros de validação dos modelos para pontos não amostrados.

Variável	Observado	Estimado	EM	RMSE	r
Ds (kg dm ⁻³)	1,97	1,97	0,00	0,03	0,35
Dco (kg dm ⁻³)	1,35	1,36	-0,01	0,01	0,23
pFG	0,23	0,22	0,01	0,01	0,24
P_{M1} (mg kg ⁻¹)	2,00	2,50	-0,49	1,26	-0,20
MOS (g kg ⁻¹)	3,60	2,87	0,72	3,78	0,26

Ds, densidade do solo; Dco, densidade corrigida; pFG, proporção da fração grosseira; P_{M1} , Fósforo Mehlich 1; MOS, matéria orgânica do solo; ME, erro médio; RMSE, Raiz quadrada do erro médio; r, correlação.

Após confirmados os erros das estimativas dos valores médios com dados externos, determinou-se o número de amostras necessárias para estimar essas médias com um desvio aceitável de 10% e um intervalo de confiança de 95% (HAN et al, 2016). Exceto no caso de pFG, cuja estimativa demandaria 82 e 59 amostras para as camadas de 0-15 e 15-30 cm, respectivamente, nos atributos físicos restantes n oscilou entre 2 e 4 amostras. No caso dos atributos químicos o número de amostras necessárias superou a centena, chegando a quase 300 amostras para estimar uma diferença de 10% nas médias de P_{M1} na camada de 15-30 cm. Diante disso, diminuiu-se o intervalo de confiança para 90%, aceitando-se detectar um desvio entre as médias de pelo menos 20%, obtendo-se um n de 9 e 6 para pFG, 17 e 18 para MOS e de 16 e 19 para P nas camadas de 0-15 e 15 -30 cm, respectivamente. (Tabela 4)

Tabela 5. Parâmetros estatísticos de atributos químicos e físicos e número estimado de amostras necessário para detectar uma diferença de 10% nos teores de atributos do solo em um Antropossolo Decápítico em região semiárida.

Parâmetro	Ds	Dtf	Dco	pFG	MOS	P _{M1}
	----- kg dm ⁻³ -----				g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
	Camada 0 – 15 cm					
Média	1,96	1,82	1,35	0,22	3,06	2,33
t Student	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99
Variância	0,03	0,02	0,01	0,01	3,9	2,14
D (10%)	0,19	0,18	0,13	0,02	0,31	0,23
n	3	2	2	82	165	156
	Camada 15 – 30 cm					
Média	1,91	1,73	1,3	0,26	3,12	0,65
t Student	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99
Variância	0,04	0,02	0,01	0,01	4,52	0,31
D (10%)	0,19	0,17	0,13	0,02	0,31	0,06
n	4	3	2	59	184	291

n, número de amostras necessárias; D, desvio entre as médias; Ds, densidade do solo; Dtf, densidade da terra fina, pFG, proporção de fração grosseira; MOS, matéria orgânica do solo; P, fósforo extraível (Mehlich 1).

No caso dos atributos químicos, o cálculo do número de amostras foi baseado nas concentrações de MOS e P_{M1}, mas em várias situações é necessário calcular estoques de nutrientes, sobretudo em pesquisas envolvendo balanço entre entradas e saídas de nutrientes numa determinada área. Na Tabela 5 foram resumidos os desvios decorrentes do uso da densidade incorreta no cálculo desses estoques, no caso de solos com cascalho ou calhaus. Tanto os estoques de MOS quanto P_{M1}, foram sobre-estimados entre 40 e 50% quando a fração grosseira foi incluída no cálculo da Ds, em relação ao mesmo cálculo utilizando a Dco.

Tabela 6. Estimativa dos estoques de fósforo e matéria orgânica do solo com base na densidade o solo e na densidade corrigida em um Antropossolo Decápítico.

Prof.	Estoque de MOS (kg ha ⁻¹)		Estoque de P (kg ha ⁻¹)	
	Ds	Dco	Ds	Dco
0 – 15 cm	8,87±5,68	6,31±4,19	6,81±4,28	4,80±3,06
15 – 30 cm	8,90±6,20	6,16±4,24	1,89±1,78	1,28±1,04

MOS, matéria orgânica do solo; P, fósforo; Ds, Densidade do solo; Dco, Densidade do solo corrigida.

3.3.3 Discussão dos resultados

Os elevados valores de densidade do solo encontrados, indicam forte grau de compactação. Aliado aos baixíssimos teores de MOS e de P encontrados na no solo, essa compactação caracteriza o acentuado estágio de degradação física e química do solo. Os teores de MOS em torno de $1,8 \text{ g kg}^{-1}$ encontrados indicaram claramente a retirada da camada de solo superficial, que normalmente acumula os maiores teores de MOS. De acordo com Salcedo e Sampaio (2008), Planossolos em região semiárida frequentemente apresentam teores de MOS em torno de 12 g kg^{-1} , valores estes, ainda inferiores aos encontrados em Neossolos litólicos e Luvisolos em mesmas condições, entre 17,9 e os $20,3 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente.

Quanto aos teores de P, não é incomum encontrar valores de 1 a 2 mg kg^{-1} de solo em solos da região (GALVÃO et al, 2008), de forma que esses baixos valores não podem ser atribuídos ao fato de ser uma área de empréstimo, embora talvez fossem maiores por conta da queda de serapilheira, na condição de mata nativa. Não foi observada nenhuma relação espacial entre os teores de MOS e P_{M1} contrariamente ao observado em um Latossolo vermelho cultivado (BARBIERI et al 2013).

O aspecto mais marcante da degradação da área refere-se aos elevados valores de densidade da terra fina, que apresentou valores acima de $1,78 \text{ g cm}^{-3}$, valores estes que ultrapassam a marca dos $1,75 \text{ g cm}^{-3}$ já considerados críticos para o desenvolvimento normal das plantas (REINERT et al, 2008). O que afeta diretamente o crescimento radicular por limitar o armazenamento e transporte de água e ar no solo, consequentemente aumentando a temperatura do solo pela baixa aeração, assim como, tornando-se uma barreira de resistência mecânica ao crescimento radicular (ZHANG et al, 2016).

Pelo fato de em regiões semiáridas a escassez de água ser o principal fator limitante ao desenvolvimento das plantas, devido à baixa precipitação anual, três aspectos devem ser considerados para o melhor aproveitamento da baixa quantidade de água disponível: a taxa de infiltração da água no solo, a sua velocidade de redistribuição no solo e a capacidade de armazenamento do solo (PEREIRA et al, 2016). Além disso, o relevo irregular promove o escoamento superficial, que limita o armazenamento de água no perfil do solo, pois diminui a infiltração (CARVALHO et. al, 2016).

A densidade elevada da fração fina do solo indica a predominância de microporos que determinam uma baixa taxa de infiltração e lenta redistribuição de água no solo, que depende fundamentalmente de um solo agregado e com boa proporção de macroporos, resultando numa maior condutividade hidráulica (BRANDÃO et al, 2006). Ao mesmo tempo, valores elevados de densidade diminuem a capacidade de armazenamento de água, por reduzir a porosidade total (BONO et al., 2012). A ausência quase completa de MOS no solo agrava essa situação, pois a MOS atua como um condicionador da estrutura do solo e contribui na formação e estabilidade de agregados do solo, que por sua vez influem sobre a densidade e porosidade do solo (RAWLS et al, 2003).

O porosidade reduzida promove uma lenta redistribuição da água em profundidade, e compromete as trocas gasosas (REICHARDT, 1981), que aliado a elevada proporção da fração grosseira e a compactação do solo representam maior resistência mecânica a penetração de raízes, o que se torna um fator limitante ao desenvolvimento do sistema radicular. Embora diferentes espécies possam apresentar condições adaptativas diferenciadas (MALAMY, 2005), haverá sempre um elevado gasto metabólico para vencer esses obstáculos, que irá limitar a produção de biomassa (GONÇALVES; LYNCH, 2014). Bengough et al (2011) apresentam uma extensa análise dos efeitos do estresse mecânico sobre o alongamento radicular e destaca a redução do crescimento e a baixa produtividade como alguns destes efeitos.

A variabilidade espacial da dinâmica de água e de crescimento radicular, embora não tenham sido medidas especificamente, podem ser inferidas da variabilidade de pFG e sua influência na Dco. Em estudo com Luvisolos e Neossolos litólicos, Fraga e Salcedo (2004) compararam áreas sob vegetação nativa e sob agricultura e observaram também uma relativa constância na quantidade de cascalho entre manejos e camadas, mas diferenças entre classes de solo. Assim, é possível inferir que a quantidade de FG e sua distribuição vertical na área experimental, representem valores típicos do solo amostrado como constatado por Cunha et al (2017).

Ainda que a presença de FG limite o volume de solo disponível para armazenamento de água e crescimento de raízes, sua mistura com a TFSA adensada introduz uma elevada quantidade de canais e o volume de macroporos nas áreas de contato entre a TFSA e os cascalhos e calhaus. Nas áreas onde pFG é pequena ou próxima de zero ($Dco \approx Dtf$), a dinâmica da água e crescimento de raízes seriam críticos devido aos altos

valores de Dtf, inclusive favorecendo o escoamento superficial (MONTENEGRO et al., 2013). Nas áreas em que pFG oscila entre 0,15 e 0,45, a presença desses canais e macroporos sem dúvida irá melhorar a entrada e distribuição de água assim como o crescimento de raízes. Observações qualitativas (não mostradas) indicaram uma correlação espacial entre o desenvolvimento de vegetação na área e a variabilidade espacial da Dco. Já para solos com densidades entre 0,8 e 1,6 g cm⁻³ Logsdon e Karlen (2004) não encontraram relação entre a densidade e a produtividade de várias espécies.

Os modelos de ajuste dos variogramas experimentais foram muito precisos na estimativa dos valores das variáveis físicas em locais que não participaram da base de dados do modelo. Essa elevada precisão resultou em um baixo número de amostras (2-3 amostras) necessárias para conseguir detectar diferenças de 10% entre as médias, com 95% de confiança. Esses números de amostras corresponderam aos encontrados por Han et al (2016) para solos com pedregosidade. Entretanto para a densidade da terra fina estes autores encontraram valores da ordem de 9 a 17 amostras para as profundidades avaliadas.

O caso das variáveis químicas foi o oposto, pois a precisão do ajuste dos teores de MOS e P_{MI} pelos modelos não foi boa (EM = 0,72 e -0,49, respectivamente). Isso exigiu um número de amostras inviável, do ponto de vista prático, para atingir o mesmo nível de separação de médias (10%) com confiança semelhante (95%) ao das propriedades físicas. Neste caso é necessário aceitar a detecção de diferenças maiores (20% ou maiores) diminuindo o nível de confiança para 90%. É importante ressaltar que no caso do cálculo de estoque de nutrientes neste tipo de áreas, a variabilidade dos estoques será da mesma ordem de magnitude da variabilidade das concentrações, requerendo também um número elevado de amostras para detectar diferenças significativas. A variabilidade da Dco, que deve ser o atributo utilizado para o cálculo dos estoques, foi bem menor que os das concentrações. NAGARAJA et al, (2016), encontraram variações de 10 a 120% no estoque de N, P e K, dependendo da proporção de fragmentos grosseiros no solo em um Planossolo degradado na Índia, concluindo que a estimativa do estoque de nutrientes para solos degradados utilizando a Ds superestima os nutrientes do solo.

3.4 CONCLUSÃO

A densidade do solo foi influenciada pela distribuição da fração grosseira e ambos atributos apresentaram dependência espacial de moderada a forte.

O cálculo do estoque de nutrientes em solos com pedregosidade sem considerar a massa e volume da fração grosseira superestima os valores reais de nutrientes disponíveis no solo.

Os atributos físicos com dependência espacial forte requerem menor número de amostras para estimativa de seus valores médios com um desvio de até 10% e intervalo de confiança de 95% atributos químicos com dependência espacial moderada a fraca.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-OMRAN, A. M; AL-WABEL, M.I; NADEEM, M. F; AL-SHARANI, S. Spatial variability for some properties of the wastewater irrigated soils. **Soil Science Society of America Journal**. S, 12, p. 167-175, 2013.
- ANDRADE, A. R. S. de et al. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 322-329, 2015.
- AQUINO, R. E; MARQUES JUNIOR, J. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. **Pesq. Agropec. Trop**. V.44, n.1, p. 32-41, 2014.
- BABALOLA, O; LAL, R. Subsoil gravel horizon and maize root growth: Gravel concentration and bulk density effects. **Plant and soil**, 46, 337-346, 1977.
- BARBIERI, D. M., MARQUES JÚNIOR, J., PEREIRA, G. T., LA SCALA, N., SIQUEIRA, D. S. PANOSSO, A. R. Comportamento dos óxidos de ferro da fração argila e do fósforo adsorvido, em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Rev. Bras. Ci. do Solo**, 37(6), 1557-1568, 2013.
- BENGOUGH, A. G., MCKENZIE, B. M., HALLETT, P. D. VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **J Exp Bot**. v.62 (1): 59-68, 2011.
- BENITES, V. M; MACHADO, P. L. O. A; FIDALGO, E. C. C; COELHO, M. R; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, 139, p. 90-97, 2007.
- BLYTH, J.E., MACLEOD, D. A. The significance of soil variability for forest soil studies in north-east Scotland. **J. Soil Sci**. 29:419-430, 1978.
- BONO, J. A. M.; MACEDO, M. C. M.; TORMENA, C. A.; NANNI, M. R.; GOMES, E. P.; MÜLLER, M. M. L. Infiltração de água no solo em um Latossolo Vermelho da região sudoeste dos Cerrados com diferentes sistemas de uso e manejo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, 2012.
- BOTTEGA, E. L; QUEIROZ, D. M; PINTO, F. A. C; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Rev. Ci. Agronom**. V. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.
- BRANDÃO, V. dos S. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: Editora da UFV, 2006. 120 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba**. Boletim 15, Série Pedologia, 8, Rio de Janeiro: 1972.

- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Sci. Soc. Ame. Jour.** v.58, p.1501-1511, 1994.
- CARVALHO, M., MIRANDA, J., DUARTE, S., CARVALHO, L. Perdas de água por escoamento superficial na interação: cobertura vegetal e práticas de controle de erosão. **Rev. Engenharia Agrícola.** v.32, n. 6, 2016.
- CAVALCANTE, E. G. S; ALVES, M. C; SOUZA, Z. M; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 31, p. 1329-1339, 2007.
- CRUZ, C. L; VASCONCELOS, A. C. F; OLIVEIRA, J. R. Situação de Impacto Ambiental: um estudo em uma Indústria de Extração Mineral. **Qualitas Rev.Eletronica**, v. 15, n. 2, 2014.
- CUNHA, J. M., DENILTO, C., CAMPOS, M. C., SOARES, M. D. Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica da Amazônia. **Rev. Ambient. Água.** v. 12, n. 2, 2017.
- CURCIO, G. R.; LIMA, V. C.; GIAROLA, N. F. B. **Antropossolos: Proposta de Ordem (1ª aproximação)**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2004.
- DOETTERL, S; BERHE, A. A; NADEU, E; WANG, Z; SOMMER, Z; FIENER, P. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. **Earth-Science Reviews**, 2016. 145, p.102-122.
- DONAGEMA, G. K. **Manual de métodos de análises de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.
- ELLERTL, B. H., BETTANY D J. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Can. J. Soil Sci.** 75: 529-538, 1995.
- FRAGA, V.S. SALCEDO, I.H. Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsistence farming. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 68:215-224, 2004.
- GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; OLIVEIRA, F. F. Acumulação de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino. **Pesq. Age. Brasileira**, v.43, p.99-105, 2008.
- GONCALVES, S. L.; LYNCH, J. P. **Pelos radiculares: seleção de genótipos em soja, girassol e trigo**. Londrina: Embrapa Soja, 2014, 24p.
- GRÄLER, B., PEBESMA, E., HEUVELINK, G. Spatio-Temporal Interpolation using gstat. **The R Journal**, 8(1), 204-218, 2016.
- HÅKANSSON, I., LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil Till. Res.**, 53:71-85, 2000.

- HAMARASHID, N. H., OTHMAN, M. A., HUSSAIN, M. H. Effects of Soil Texture on Chemical Compositions, Microbial Populations and Carbon Mineralization in Soil. **Egypt. J. Exp. Biol.** 6(1): 59 – 64, 2010.
- HAN, Y., ZHANG, J., MATTSON, K. G., ZHANG, W. WEBER, T. A. Sample Sizes to Control Error Estimates in Determining Soil Bulk Density in California Forest Soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 80:756–764, 2016.
- HIEMSTRA, P.H., PEBESMA, E.J., TWENHOFEL, C.J.W. AND G.B.M. HEUVELINK, Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch Radioactivity Monitoring Network. **Computers & Geosciences**, 9, 145–166, 2008.
- HILLER, D. A. Properties of Urbic Anthrosols from an abandoned shunting yard in the Ruhr area, Germany. **Catena**, 39, 245–266, 2000.
- ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York, Oxford University Press, 1989. 561p.
- KÖEPPEN, W. Klassifikation der klimate nach temperatura, niederschlag und jahreslauf. **Pet. Geo. Mitt.** Gotha, v. 64, p. 193-203, 1918.
- KOHL, K. D. Mechanics of rill headcutting. **Retro. Theses Dissertations**, 8861, 1988.
- KUMAR, S. Estimating spatial distribution of soil organic carbon for the Midwestern United States Using historical database. **Chemosphere**, 127, p. 49-57, 2015.
- KRUPSKI, M., KABALA, C., SADY, A., GLIŃSKI, R., WOJCIESZAK, J. Double-and triple-depth digging and Anthrosol formation in a medieval and modern-era city (Wrocław, SW Poland). Geoarchaeological research on past horticultural practices. **Catena** 153, p. 9–20, 2017.
- LOGSDON, S.D.; KARLEN, D.L. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. **Soil & Tillage Research**, v.78, p.143-149, 2004.
- MALAMY, J. E. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. **Plant Cell Environ.** 28;67-77, 2005.
- MARCOLIN, C.D. & KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Sci. Agron.**, 33:349-354, 2011.
- MATZIRIS, E, STEFANO, E PAPAFAEIRIOU, A. Z, SEILOPOULOS, D. PAPAIOANNOU, A. Impacts of Human Activities on Soil Physical Properties of Urban Green Areas: A Case Study in Thessaloniki City, Greece. **Carpathian J. Earth Envir. Sci.**, v. 11, p. 381-394, 2016.

- MONTENEGRO, A. A. A.; ABRANTES, J. R. C. B.; LIMA, J. L. M. P.; SINHG, V. P.; SANTOS, T. E. M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. **Catena**, Amsterdam, v.109, p. 139-149, 2013.
- MOTOMIYA, A. V. A. Wagner Rogerio MOTOMIYA, W. A., MOLIN, J. P., LIRA, L., Di OLIVEIRA, J. R., BISCARO, G. A. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade do algodoeiro. **Rev. Agrarian**, Dourados, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2011.
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chim. Acta**, 27:31-36, 1962.
- NAGARAJA, M. S., SRINIVASAMURTHY, C. A.: Soil fertility in physically degraded soils: Are we over estimating? **Curr. Sci. India**, 97, 1534–1536, 2009.
- PEREIRA, L. S., RODRIGUES, A. M., JORGE, M. C. O., GUERRA, A. J. T., FULLEN, M. A. processos hidro-erosivos em solos degradados em relevo de baixa declividade. **R. Bras. Geomorfologia**, v. 17, n. 2, 2016.
- RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A.; RITCHIE, J.C.; SOBECKI, T.M. & BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, 116:61-76, 2003.
- REICHARDT, K. **Soil physico-chemical conditions and the development of roots**. In: The Soil/Root System in Relation to Brazilian Agriculture, 1980, Londrina. Proceedings... Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 1981. p.103-114.
- SCHULTE, E. E.; J.B. PETERS; P.R. HODGSON. **Wisconsin Procedures for soil testing, plant analysis and fud & forage analysis**. Department of soil Science. University of Wisconsin-Extension, Madison, WI, 1987. 9p.
- SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. **Matéria orgânica do solo no bioma caatinga**. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p.419-441.
- SAS INSTITUTE INC. **SAS/STAT® University Edition**, User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc, 2016.
- SATO, M. K; LIMA, H. V; OLIVEIRA, P. D; RODRIGUES, S. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. **Int. Agrophys**, 29, p. 441-447, 2015.
- SCHULTE, E. E.; J.B. PETERS; P.R. HODGSON. **Wisconsin Procedures for soil testing, plant analysis and fud & forage analysis**. Department of soil Science. University of Wisconsin-Extension, Madison, WI, 1987. 9p.
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. **Ciência Rural**, v. 30, n. 6, p. 1065-1068, 2000.

- RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A.; RITCHIE, J.C.; SOBECKI, T.M. & BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, 116:61-76, 2003.
- REICHERT, J. M; SUZUKI, L. E. A. S; REINERT, D. J; HORN, R. HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & tillage research**, 102, p. 242-254, 2009.
- REINERT, D. J; ALBUQUERQUE, J. A; REICHERT, J. M; AITA, C; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Rev. Bras. Ci. do Solo**, 32:1805-1816, 2008.
- VAN WESEMAEL, B., MULLIGAN, M., POESEN, J. Spatial patterns of soil water balance on intensively cultivated hillslopes in a semi-arid environment: the impact of rock fragments and soil thickness. **Hydrol. Process.** 14, 1811–1828, 2000.
- ZHANG, X., TAN, M., CHEN, J., SUN, Y. Impact of land use change on soil resources in the peri-urban area of Suzhou city. **Jour. Geo. Sciences** 15, 1. 71-79, 2005.
- ZHANG, Y. ZHANG, M., NIU, J., LI, H., XIAO, R. et. al. Rock fragments and soil hydrological processes: Significance and progress. **Catena**, v. 147 p.153-166, 2016.

CAPÍTULO II

REUSO DE ÁGUA NA RECUPERAÇÃO DOS TEORES DE MATÉRIA ORGÂNICA E FÓSFORO EM SOLO DEGRADADO

POTENCIAL DO REUSO DE ÁGUA PARA CRESCIMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS E RECUPERAÇÃO DE SOLO DEGRADADO

RESUMO:

A recuperação da capacidade produtiva de solos degradados demanda elevado custo e tem, particularmente em regiões semiáridas, a escassez hídrica como o principal agravante. Nesse sentido, a utilização de água residuária tratada tem se destacado como uma prática promissora por ser uma fonte de água e nutrientes de baixo custo. Com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de água residuária tratada (AR) na recuperação dos teores de matéria orgânica (MOS) e fósforo (P) em um Antroposolo Decápítico em área de empréstimo na região semiárida, foi realizado experimento com plantio e irrigação de cinco espécies florestais de ocorrência na caatinga: Aroeira (*Astronium urundeuva* Allemão/Engl.), Brauna (*Schinopsis brasiliensis* Engl.), Catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul), Freijó (*Cordia trichotom* Vell), Ipê roxo (*Handroanthus impetiginosus* Mart.). Os tratamentos consistiram da variação de volume e tipo de água, assim foram utilizados três tratamentos: 7 L semana⁻¹ de água de abastecimento (AA), 7 L semana⁻¹ de AR e 14 L semana⁻¹ de AR. Após decorridos três anos de irrigação, foram avaliados os atributos químicos do solo: MOS, P e P orgânico, bem como as variáveis de crescimento das espécies florestais: altura e diâmetro a altura do peito (DAP). Os tratamentos com AR proporcionaram aumento expressivo nas quantidades de MOS e P em comparação com o tratamento com AA em relação a condição inicial do solo. Os teores de MOS e P foram de 5 a 8 vezes superiores no tratamento de aplicação de 14 L de AR que com aplicação de AA na camada superficial de 0 - 15 cm. Observou-se aumento expressivo desses teores também na profundidade 15 - 30 cm, tanto em relação a AR quanto a AA o que provavelmente está relacionado a textura franco-arenosa do solo. Apesar disso, não houve diferença significativa entre os tratamentos para altura e DAP das espécies florestais. De maneira geral a irrigação com AR foi responsável por um incremento elevado nos teores de MOS e P no solo em todos os tratamentos até os 30 cm de profundidade.

Palavras-chave: água residuária, matéria orgânica do solo, fósforo orgânico.

POTENCIAL OF WATER REUSE FOR FORESTRY SPECIES GROWTH AND RECOVERY OF DEGRADED SOIL

ABSTRACT:

Soil degradation by removing soil surface horizons impacts directly on soil quality, causing irreversible damage to its fertility. The recovery of soil productivity demands high cost, the water scarcity is the main aggravating factor particularly in semi-arid regions. The use of wastewater (WW) presents itself as a promising practice for presenting nutrients such as nitrogen (N) and phosphorus (P), normally found in high concentrations in WW. In this sense, with the objective of evaluating the effect of the application of WW in the recovery of the soil organic matter (SOM) and P contents in a Decapitated Anthrosol in a loan area in the semi-arid region. The contents of these nutrients were evaluated after three years of weekly application of 7 liters of drinking water (DW), 7 liters of WW and 14 liters of WW. The treatments with WW provided an expressive increase in the amounts of MOS and P in comparison with the treatment with DW in relation to the soil initial condition.. The levels of MOS and P were 5 to 8 times higher in the application treatment of 14 l of WW than with application of DW in the superficial layer of 0-15 cm. There was also an expressive increase of these contents also in depth 15-30 cm, Both in relation to WW and DW which is probably related to the clayey-sandy texture of the soil. In general irrigation with WW was responsible for a high increase in the levels of SOM and P in the soil in all until 30 cm of depth.

Keywords: wastewater, soil organic matter, organic phosphorus.

4.1 INTRODUÇÃO

A degradação do solo é um problema que incide sobre 33% da superfície terrestre, atingindo em torno de 42% da população mundial (FAO, 1998). Dentre as diversas causas de degradação, por ser uma prática comum, o uso do solo como área de empréstimo é a mais agressiva e resulta na remoção total ou parcial de horizontes superficiais e exposição de camadas subjacentes o que se traduz em impactos diretos na qualidade do solo, causando danos irreversíveis a sua fertilidade (DOETTERL et al, 2016). Como agravante, os estudos de viabilidade ambiental de mineração e extração de solo, quando realizado, são geralmente incipientes e não contemplam técnicas de recuperação do solo (MEYER, et al, 2014, SANTOS et al, 2015).

Em regiões com deficiência hídrica acentuada, a recuperação dessas áreas de empréstimo fica ainda mais comprometida, pela limitação hídrica para produção de biomassa vegetal. A utilização de água proveniente de estações de tratamento de esgoto doméstico (ETE) tem se mostrado uma prática estratégica tanto na produção florestal ou de forragem quanto na recuperação de solos degradados (BECERRA-CASTRO et al., 2015 al, BONINI et al, 2015). Várias publicações de órgãos internacionais destacam o interesse mundial no tema de reutilização de águas residuárias. A FAO e a UNEP-WHO têm publicado manuais com diversas técnicas para a reutilização correta de água residuárias (MONTE; ALBUQUERQUE; 2010; MATEO-SAGASTA et al., 2013) assim como, com considerações de ordem econômico (WINPENNY et al., 2010).

O uso dessas águas apresenta desafios técnicos, legais, econômicos e sociais, já que há riscos à saúde humana, assim como riscos de introdução de contaminantes no solo, e, eventualmente em algumas regiões, em aquíferos (DICKIN et al. 2016; MIZYED, 2013). Esses riscos precisam ser muito bem balanceados pelos benefícios de segurança alimentar, nutricional e econômicas que essa fonte hídrica oferece, sobretudo em regiões áridas e semiáridas (DICKIN et al., 2016). Além do aspecto hídrico, a água residuária (AR) apresenta também conteúdos variáveis de sólidos em suspensão, matéria orgânica e elementos químicos e, dependendo da fonte da AR, pode também apresentar níveis excessivos de sais, metais pesados e compostos orgânicos tóxicos (ELGALLAL et al. 2016).

Para o caso específico de recuperação de áreas de empréstimo ou degradadas na região semiárida, a possibilidade de recuperar os teores de MOS e de realizar aportes de N, P e K para viabilizar a produção de biomassa, apresenta-se como uma alternativa

estratégica, embora não tenham sido encontrados trabalhos publicados nesse sentido em escala de campo. Algumas pesquisas têm avaliado o transporte de solutos de águas residuárias em diversas classes de solos, mas limitadas a colunas de solo ou vasos (MEDEIROS et al., 2005; ANAMI et al., 2008; CARVALHO et al., 2013).

O fósforo é normalmente encontrado em concentrações elevadas nas ARs, com teores variando de 11 a 22 mg L⁻¹ em formas orgânicas e inorgânicas, e por esse motivo é considerado um poluente de cursos de água, causando eutrofização das águas em ambientes não poluídos pelo acúmulo exagerado de N e P (KLEIN; AGNE, 2012). Por outro lado, na região semiárida, é frequentemente o P é o nutriente mais limitante para a produtividade, devido aos baixos teores em que se encontra no solo, em torno de 3 mg kg⁻¹ (SALCEDO; SAMPAIO, 2008, BERTOL et al, 2011), fato que, juntamente com a baixa disponibilidade hídrica, limitam a produção de biomassa. Em áreas de empréstimo, das quais se retira a camada superficial mais fértil, os teores de MOS residuais são muito baixos. Assim, o N, a maior parte do qual está associado a matéria orgânica, também pode se transformar em fator limitante à produção vegetal, sobretudo em plantas não fixadoras de N.

No solo o P apresenta pouca mobilidade, e é raramente perdido por lixiviação, embora tem-se demonstrado o deslocamento vertical de P em solos arenosos sob adubação orgânica (GALVÃO et al 2008; GALVÃO; SALCEDO, 2009, BERTOL et al, 2011). Em condições onde a disponibilidade de P inorgânico é baixa, o P orgânico pode se constituir numa importante fonte desse nutriente às plantas, tendo sua dinâmica estreitamente ligada à dinâmica da MOS (SOLOMON et al., 2002; SANTOS et al., 2008).

Nesse sentido, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de água residuária tratada na recuperação dos teores de matéria orgânica e fósforo do solo e no crescimento de espécies florestais em um Antropossolo Decápico em área de empréstimo na região semiárida.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em área experimental localizada nas imediações da sede do Instituto Nacional do Semiárido (INSA) em Campina Grande, PB, ($7^{\circ}15'11''\text{S}$ a $7^{\circ}15'13''\text{S}$ e $35^{\circ}56'49''\text{W}$ a $35^{\circ}56'51''\text{W}$) com dimensões de 60 m de largura por 60 m de comprimento, totalizando 3.600 m².

A região é caracterizada por um clima quente e úmido com regime pluviométrico irregular e longo período de estiagem classificado como As' de acordo com a classificação de Köppen (1918). A temperatura do ar varia entre a máxima anual de 28,6°C e a mínima 19,5 °C e a umidade relativa com média em torno de 80%.

O relevo da área de estudo é suave ondulado e o solo anteriormente correspondente a um Planossolo Nátrico (BRASIL, 1972) com histórico de utilização como área de empréstimo para remoção de solo, foi classificado como Antropossolo Decapítico (DONAGEMA, 2004).

4.2.2 Caracterização da água residuária

A água residuária utilizada para irrigação do experimento foi obtida de uma estação de tratamento primário (Figura 1) que trata o esgoto proveniente de banheiros e cozinha do Instituto Nacional do Semiárido (INSA) e está localizada nas imediações da área experimental; a água é aplicada via sistema de irrigação por gotejamento.



Figura 1. Estação de tratamento de esgoto doméstico da sede do Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, Paraíba.

Foi realizada caracterização química da água residuária utilizada para irrigação do experimento quanto ao pH, condutividade elétrica, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e sódio acordo com metodologia padrão para águas residuárias (APHA, 1998).

4.2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzindo com delineamento em blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, constituído de quatro blocos com cinco parcelas correspondentes às espécies florestais e três tratamentos, correspondentes ao tipo e volume de água utilizado, conforme figura 2.

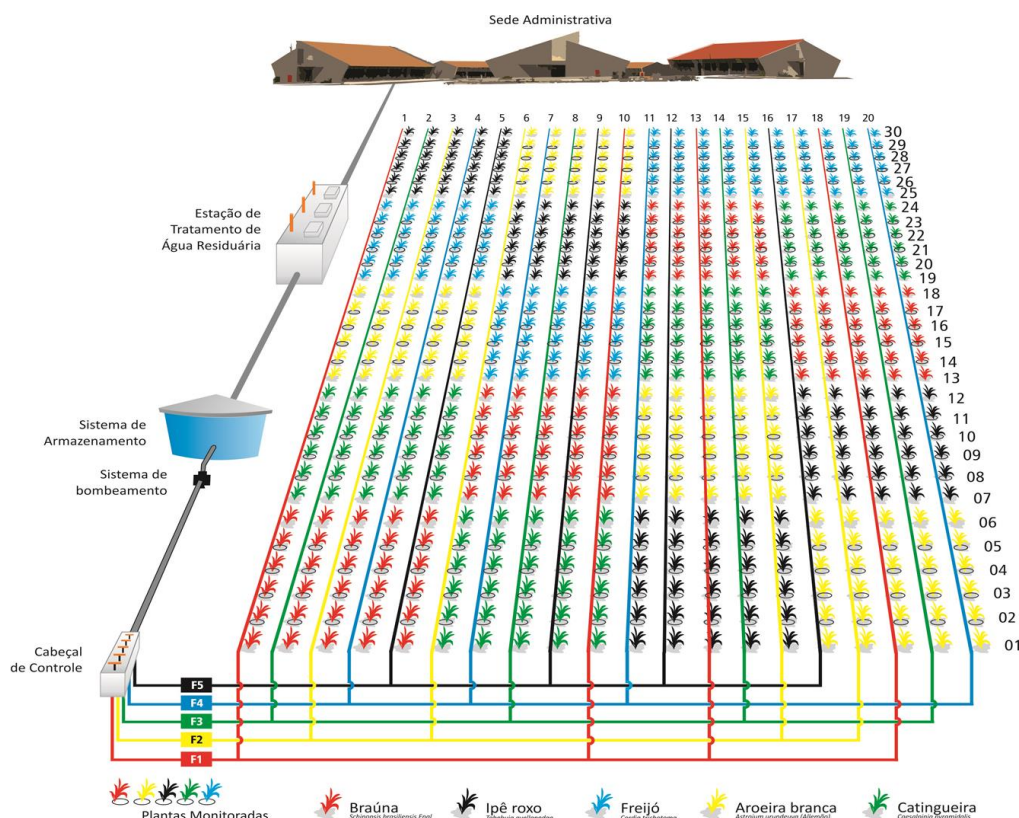


Figura 2. Delineamento experimental e distribuição de tratamentos em um Antropossolo Decápico com aplicação de água residuária tratada.

As espécies florestais utilizadas foram: Aroeira (*Astronium urundeuva* Allemão/Engl.), Brauna (*Schinopsis brasiliensis* Engl.), Catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul), Freijó (*Cordia trichotom* Vell), Ipê roxo (*Handroanthus impetiginosus* Mart.).

Os tratamentos foram constituídos por três combinações de tipo e volume de irrigação. Dessa forma os tratamentos consistiram da aplicação de lâmina de 7 L semana⁻¹ de água de abastecimento (AA), aplicação de 7 L semana⁻¹ de água residuária tratada (AR7)

e aplicação de 14 L semana⁻¹ de água residuária tratada (AR14). Em todos os tratamentos a irrigação foi realizada por gotejamento localizados a 10 cm de distância do caule das plantas.

4.2.4 Amostragem e caracterização inicial do solo

A amostragem de solo foi realizada com o auxílio de um cavador, por se tratar de uma área com muita pedregosidade. Para caracterização química e física inicial da área foram definidos 80 pontos amostrais e retiradas amostras de solo nas camadas de 0-15 e 15-30 cm no ano de 2012, antes da implantação dos tratamentos. O solo coletado foi seco e peneirado em malha de 2 mm e analisado quanto aos atributo químicos: pH, N, P, K⁺, Ca⁺², Mg⁺², Na⁺², Al⁺³, H+Al (Tabela 2) de acordo com metodologia da Embrapa (DONAGEMA et al, 2011) e matéria orgânica (MOS) pelo método de ignição em mufla a 550 °C (SCHULTE et al, 1987) e granulometria (Tabela 3) de acordo com metodologia da Embrapa.

Tabela 1. Atributos químicos de um Atropossolo Decápico em área de empréstimo em região semiárida.

pH	MOS	N	P	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺²	Al ⁺³	H+Al	PST
	-- g kg ⁻¹ --		----mg dm ⁻³ ----			-----cmol _c kg ⁻¹ -----				%
0 - 15 cm										
5,9	3,01	0,6	2,33	54,6	1,52	0,22	0,51	0,25	26,4	7,6
15 - 30 cm										
6,0	3,12	0,5	0,65	46,8	1,67	0,18	0,50	0,25	26,9	6,8

MOS, matéria orgânica do solo, PST, porcentagem de sódio trocável.

Tabela 2. Caracterização granulométrica e textural em um Atropossolo Decápico em área de empréstimo em região semiárida.

Profundidade	Fração granulométrica			Classe Textural
	Areia	Silte	Argila	
cm	----- g kg ⁻¹ -----			
0-15	716	150	134	Franco arenoso
15-30	707	146	147	Franco arenoso

4.2.5 Amostragem e caracterização final do solo

No terceiro ano após implantação dos tratamentos foi realizada amostragem de solo de acordo com o mesmo procedimento adotado na amostragem inicial. Na qual foram coletados 10 pontos em cada linha correspondente aos tratamentos, retirando-se amostras de solo em duas profundidades, 0 a 15 cm e 15 a 30 cm, distanciadas a 30 cm do caule das plantas, totalizando 30 pontos por bloco.

O solo coletado foi seco e peneirado em malha de 2 mm e analisado quanto aos teores de matéria orgânica do solo pelo método de ignição em mufla a 550 °C (SCHULTE et al, 1987).

Foram quantificadas duas frações de fósforo no solo. O fósforo extraível, utilizando extrator Mehlich-1, quantificado por colorimetria (MURPHY; RILEY, 1962) e o fósforo orgânico (Po), quantificado pelo método proposto por Saunders & Williams (1955), através da mineralização do P orgânico em forno mufla a 550°C seguidas de extração por ácido sulfúrico, subtraindo-se das amostras não ignificadas.

4.2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), utilizando o PROC MIXED do pacote estatístico SAS University Edition (SAS, 2016). Os atributos do solo foram combinados como variáveis em análise de componentes principais (ACP) para observar as interrelações entre os atributos químicos nos tratamentos, utilizou-se a função *prcomp* do pacote *stats* do software R. Em seguida foi executada análise de correlação canônica entre os atributos químicos e físicos do solo antes da implantação dos tratamentos e os atributos químicos após os três anos para verificar quais dos atributos iniciais estão mais correlacionados com os finais. Foi utilizado o pacote CCA do software R (R Core team, 2016).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Qualidade da água e aporte de nutrientes ao solo

A análise da adequabilidade das águas para uso na irrigação quanto a problemas relacionados à salinidade demonstrou que tanto a água de abastecimento (AA) quanto a água residuária tratada (AR) com condutividade elétrica de 0,79 e 1,35 dS m⁻¹, respectivamente (tabela 1), apresentaram grau de restrição ligeira a moderado, CE entre 0,7 e 3,0 dS m⁻¹ de acordo com classificação de Ayers & Westcot (1999). Apesar dessa classificação não corresponder as condições de solos degradados em região semiárida, pode ser utilizada como parâmetro para gerenciar o risco de salinização do solo.

No que se refere à toxicidade de íons específicos, a concentração de sódio não apresentou restrição para uso na irrigação, ambos os tipos de água apresentaram concentração deste elemento menor que 69 mg L⁻¹, valor que caracteriza o nível de restrição. Quanto a concentração de cloreto, a AA com teor de cloro de 178 mg L⁻¹ e a AR com teor de 270 mg L⁻¹, apresentaram grau de restrição ligeira a moderado, correspondente a teores de Cloro entre 142 e 355 mg L⁻¹.

Tabela 3. Caracterização química da água de abastecimento e da água residuária tratada utilizada na irrigação da área experimental.

Parâmetro	Unidade	Água	
		Abastecimento	Residuária
pH	-	7,5	8,3
CE	dS m ⁻¹	0,79	1,35
COT	mg L ⁻¹	1,72	3,7
N	mg L ⁻¹	0,28	26,3
NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	-	22,3
NO ₂ ³⁻	mg L ⁻¹	-	4,5
P	mg L ⁻¹	1,68	14
PO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	-	9,4
K ⁺	mg L ⁻¹	5,4	27,6
Ca ⁺²	mg L ⁻¹	11,2	24,5
Mg ⁺²	mg L ⁻¹	6,4	10,7
SO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	-	51,9
Na ⁺	mg L ⁻¹	9,1	22,3
Cl ⁻		178	270

CE, condutividade elétrica; COT, carbono orgânico total; N, nitrogênio total; NH₄⁺, nitrogênio amoniacal; NO₂³⁻, nitratos; P, fósforo total; P₄³⁻, fosfatos; K⁺, potássio; Ca⁺², cálcio; Mg⁺², magnésio; SO₄³⁻, sulfatos, Na⁺, sódio, Cl⁻, cloro.

O pH de ambos os tipos de água utilizados apresentou faixa normal, equivalente a pH entre 6,5 e 8,4, pela classificação de Ayers & Westcot (1999). Nessa faixa de pH a concentração H⁺ e OH⁻, contida nas águas de irrigação, exerce menor influência na

disponibilidade e absorção de nutrientes pelas plantas, propriedades do solo e nos sistemas de irrigação (DUARTE et al, 2008).

Devido as expressivas quantidades de N, P, K, Ca, Mg na AR, o aporte destes nutrientes no solo aplicados via irrigação com AR (tabela 4) foi, naturalmente superior a AA quantificado com base nas concentrações de nutrientes presentes na AR apresentados na tabela 1.

Tabela 4. Aporte de nutriente aplicados ao solo em 3 anos de irrigação com água residuária em kg m⁻³.

Tratamento	Lâmina	Quantidade de Nutriente						
		MOS	N	P	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺
	mm							
AA	728	20,24	2,9	17,3	55,6	115,3	65,9	93,7
AR ₇	728	65,7	270	144	284	252	110	229
AR ₁₄	1456	131	541	288	568	504	220	459

AA, 7 L semana⁻¹ de água de abastecimento; AR₇, 7 L semana⁻¹ de água residuária tratada; AR₁₄, 14 L semana⁻¹ de água residuária tratada; MOS, matéria orgânica do solo; P, fósforo; K⁺, potássio; Ca⁺², cálcio; Mg⁺², magnésio; Na⁺, sódio.

4.3.2 Efeitos nos atributos químicos do solo

A irrigação com AR proporcionou um incremento elevado nos teores de MOS, P e P orgânico nas duas camadas avaliadas em comparação com a irrigação com AA (Tabela 5). O pH do solo irrigado com AR foi ligeiramente inferior ao do solo irrigado com AA nas duas profundidades avaliadas, entretanto não apresentou diferença estatística significativa (p<0,05).

Os teores de MOS no solo irrigado com AR apresentaram incremento significativamente elevado em relação a AA. Na profundidade de 0 – 15 cm com aplicação de 14 L de AR proporcionou valores até 5 vezes superiores a aplicação de AA e na profundidade de 15 – 30 cm essa diferença foi ainda maior, com valores até 8 vezes superiores.

Os teores de P Mehlich-1 no solo na camada de 0-15 cm quando irrigados com AR foram até 4 vezes superiores ao solo irrigado com AA e na camada de 15 – 30 a diferença foi menor, entretanto ainda 3 vezes superior a AA. Em relação aos teores de P orgânico a diferença foi ainda maior entre os tratamentos, na ordem de 6 a 8 vezes superior no solo irrigado com 14 L de AR em relação a AA.

Tabela 5 – Análise de variância e teste de média para atributos químicos um Antropossolo Decápico antes e após irrigação com água residuária tratada e água de abastecimento em região semiárida.

Fonte de variação	pH	MOS	Fósforo	Fósforo orgânico
	-	g kg ⁻¹	----- mg kg ⁻¹ -----	
	----- Profundidade (0 – 15 cm) -----			
Tratamento	*	**	**	**
Bloco	ns	*	*	*
Condição inicial	5,87b	3,01c	2,33c	9,28c
AA	6,11a	2,66c	2,32c	6,64c
AR ₇	5,98a	7,84b	4,82b	19,2b
AR ₁₄	5,58b	14,6a	9,48a	36,6a
	----- Profundidade (15 – 30 cm) -----			
Tratamento	*	**	**	**
Bloco	ns	*	*	*
Condição inicial	6,03a	3,12c	0,65c	4,02c
AA	6,21a	1,37d	1,57c	3,43c
AR ₇	6,04a	6,26b	2,93b	15,6b
AR ₁₄	5,66b	11,3a	4,61a	28,2a

ns, não significativo; * significativo a 5% pelo teste Tukey; Letras minúsculas na coluna comparam tratamentos em relação a condição inicial; letras Maiúsculas comparam tratamentos entre si após irrigação; MOS, matéria orgânica do solo; AA, 7 L semana⁻¹ de água de abastecimento; AR₇, 7 L semana⁻¹ de água residuária tratada; AR₁₄, 14 L semana⁻¹ de água residuária tratada.

Em relação a condição inicial, os tratamentos com aplicação de AR proporcionaram ligeira acidificação do solo pela redução do pH, enquanto que a AA elevou sensivelmente os valores de pH em ambas as profundidades avaliadas. Quanto aos teores de MOS a aplicação de AA proporcionou uma redução desses valores uma vez que a quantidade de carbono e nutrientes aportada pela AA foi bastante reduzida. Enquanto isso, a AR proporcionou elevado incremento desses valores tanto no volume de 7 quanto no de 14 l semana⁻¹.

Os teores de P mehlich e P orgânico aumentaram consideravelmente com a irrigação com AR em relação a condição inicial. A irrigação com AA apenas reduziu os teores de P em ambas as profundidades, proporcionado pelo baixo teor deste nutriente aportado pela AA.

O incremento da MOS aumenta a capacidade de retenção e armazenamento de água e nutrientes como P e N. Segundo Primavesi et al (2002) aumenta ainda a capacidade de troca de cátions e auxilia na retenção de K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} . Apesar da matéria orgânica contida na água residuária de origem doméstica geralmente apresentar concentrações relativamente baixa, entretanto com irrigação frequente, pode incorporar elevadas quantidades de MO no solo (MATOS et al, 2003), Esses autores relataram influência da MOS sobre as propriedades físicas do solo como a estrutura e estabilidade dos agregados, aeração, drenagem e retenção de água.

O aumento significativo dos teores de P após a aplicação de AR também foram observados por outros autores (CAOVILLA et al, 2010; ANAMI et al, 2008) estudando as características químicas de solos cultivados irrigados com água residuária. É importante destacar a ocorrência de aumento dos teores de P na camada sub-superficial, onde os valores médios observados na amostragem inicial passaram de $0,65 \text{ mg kg}^{-1}$ para até $4,61 \text{ mg kg}^{-1}$ na camada dos 15 a 30 cm de profundidade após a aplicação de água residuária.

O aumento significativo dos teores de P em profundidade foi detectado tanto em relação a irrigação com AA quanto a irrigação com AR. Essa condição não era esperada, uma vez que o P é considerado um ânion relativamente imóvel em solos e interage com a fase sólida formando precipitados com Ca, Fe e Al (OLATUYI et al., 2009), diminuído sua mobilidade, principalmente em solos com maiores teores de argila. Por outro lado, em solos com textura arenosa a franco-arenosa como neste caso há relatos de ocorrência de transporte vertical. O deslocamento vertical de P no solo quando a fonte de P é um fertilizante líquido (VITTI et al, 1994) ou quando é aplicado com fertirrigação por gotejamento (COELHO et al., 2004) e várias vezes superior que quando aplicado ao solo na forma sólida.

Caovilla et al (2010) identificaram baixa mobilidade de P no perfil do solo em Latossolo Vermelho irrigado com água residuária por gotejamento. Corroborando com os resultados encontrados por Araújo et al. (2003) e Heathwaite et al. (2000) que consideraram insignificantes as perdas de P por lixiviação, mas vale salientar que esses autores estudaram solos com teores altos de argila.

Devido a menor capacidade de adsorção de P em solos de textura arenosa ocorre uma maior mobilidade pelo transporte vertical do P, considerada inexistente em solos argilosos, devido a sua alta afinidade com os colóides do solo (HEATHWAITE, 2000).

Dessa forma, em solos arenosos o aporte de P no solo via irrigação por AR, proporciona o aumento das concentrações de P disponível, tanto em camadas superficiais, como subsuperficiais (MOHAMMAD; MAZAHREH, 2003).

Portanto, o aumento nos teores de P constatados no presente estudo, certamente está associado a textura do solo, mais arenosa, que permitiu a movimentação vertical do P adsorvido aplicado na camada superficial para as camadas subsuperficiais. Segundo Falkiner e Polglase (1997), a capacidade do solo em reter P contribui para prevenir a lixiviação do P abaixo da zona radicular, podendo determinar a sustentabilidade dos cultivos em que se utilize água residuária na irrigação. Todavia, na aplicação de águas residuárias ao solo é assumido que o P é altamente retido no solo, mas estudos demonstram aumento na concentração de P nas camadas mais profundas, embora muitas das vezes estes incrementos do P solução sejam pouco significativos (JOHNS; MCCONCHIE, 1994).

4.3.3 Análise de componentes principais

A análise de componentes principais das propriedades químicas do solo submetido aos tratamentos com AA e AR em duas profundidades (tabela 6). A variância contida em cada componente principal gerado foi expressa pelos autovalores da matriz padronizada, dessa forma os maiores autovalores representam os primeiros componentes principais, e explicam a maior parte da variância dos dados originais.

Tabela 6. Autovetores dos componentes principais de atributos químicos de um Antropossolo Decapítico com aplicação de água residuária tratada.

Variáveis	Componente1	Componente 2
Profundidade (0 – 15 cm)		
P Mehlich	0,556	0,040
P orgânico	0,585	0,063
MOS	0,581	0,061
pH	-0,096	0,995
Variância explicada (%)	68,9	24,6
Variância acumulada (%)	68,9	93,5
Profundidade (15 – 30 cm)		
P Mehlich	0,544	-0,023
P orgânico	0,592	0,124
MOS	0,577	0,128
pH	-0,137	0,983
Variância explicada (%)	66,9	24,4
Variância acumulada (%)	66,9	91,3

*significativos P, fósforo; MOS, matéria orgânica do solo.

Na profundidade de 0 – 15 cm, a primeira componente principal (CP1) apresentou correlação positiva com os atributos MOS, P e P orgânico, enquanto a segunda componente principal (CP2) apresentou correlação elevada com o atributo pH. Juntas as componentes principais 1 e 2 explicaram 93,5% da variância acumulada nessa profundidade. Os atributos MOS, P e P orgânico evidenciaram expressivo aumento em função do tratamento AR14, enquanto o pH tem valores mais elevados na condição inicial e na irrigação com água de abastecimento (figura 3). A correlação negativa do pH e positiva para os demais atributos no CP1 indica que o aumento destes atributos tende a reduzir o pH.

Na profundidade de 15 – 30 cm, as componentes principais 1 e 2 explicaram 91,3% da variância acumulada, gerando agrupamento semelhante a profundidade anterior. Os atributos MOS, P e P orgânico apresentaram correlação positiva entre si e correlação negativa com o pH na CP1, indicando que a medida que aumenta os teores desses atributos, há uma diminuição no pH do solo.

De acordo com Bolzani et al (2012), a utilização de água residuária pode provocar um efeito residual ácido devido em função da reação de nitrificação, sobretudo em solos arenosos. Simonete (2001) evidenciou que a aplicação de efluentes de esgoto pode acidificar ligeiramente o solo, sendo esta acidificação atribuída às reações de nitrificação da NH_4^+ . Entretanto, a possibilidade de alteração do pH no solo é reduzida à medida que aumenta os teores de MOS no solo, que apresenta capacidade de tamponamento, reduzindo possibilidade de acidificação do solo. Falkiner & Smith (1997) observaram aumento no valor de pH de solos irrigados com água residuária por longos períodos e diminuição do teor de Al trocável, devido ao aumento dos cátions trocáveis no solo como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ .

Na figura 3 pode-se verifica-se as correlações entre os atributos químicos do solo e os tratamentos, representados pelos vetores que indicam o sentido do aumento dos valores das variáveis estudadas que apresentam maior representatividade. É possível visualizar o sentido do aumento nos valores dos atributos nos diferentes tratamentos. O tratamento AA apresenta grande semelhança com a condição inicial e que os tratamentos AR₇ e AR₁₄, promoveram aumento dos teores de MOS, P e P orgânico e redução do pH tanto na profundidade de 0 – 15 cm (figura 3a), quanto na profundidade de 15 – 30 cm (figura 3b).

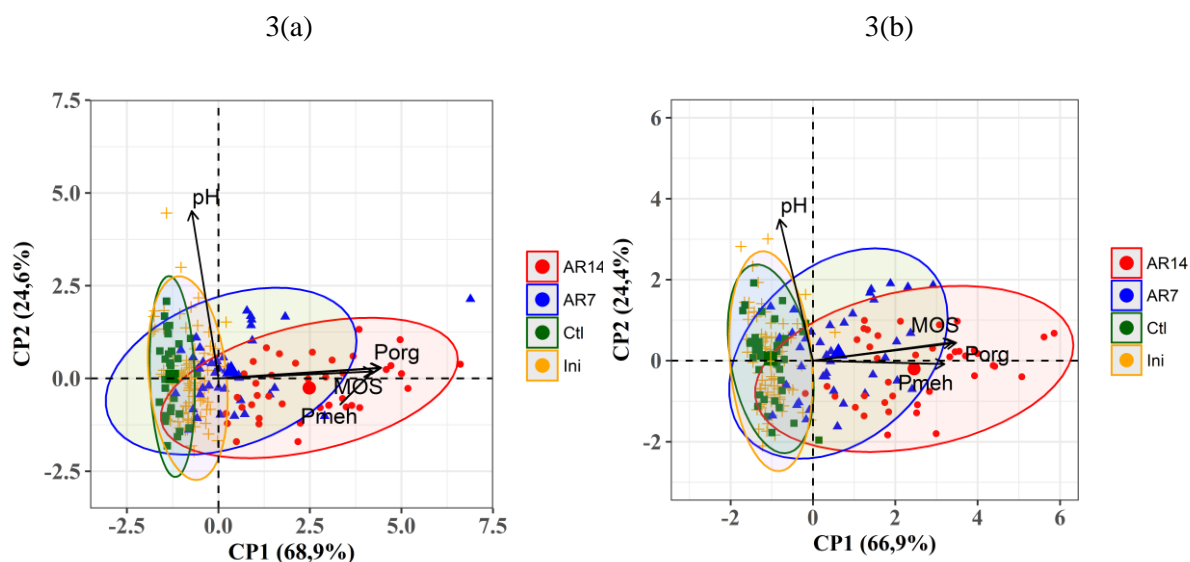


Figura 3. Análise de componentes principais para atributos químicos de solo com aplicação de água de abastecimento e água residuária tratada na profundidade de 0 – 15 cm (3a) e na profundidade de 15 – 30 cm (3b).

Visando identificar e selecionar os atributos e fatores dominantes de solos desérticos irrigados com água residuária no Novo México Adhikari et al, (2011) durante 5 anos agruparam vários atributos do solo por meio de ACP e identificaram a sodicidade como fator dominante e o sódio como o principal atributo em cada profundidade avaliada.

Azouzi et al (2015) avaliando os efeitos da irrigação a longo prazo (20 anos) com água residuária tratada nas propriedades químicas de três tipos de solo em clima semiárido verificaram redução do pH e condutividade elétrica e elevado incremento no teor de matéria orgânica do solo. Estes autores utilizaram ACP e verificaram que os impactos da irrigação a longo prazo com água residuária tratada é dependente dos parâmetros químicos e físicos iniciais.

4.3.4 Análise de correlação canônica

Com o intuito de verificar a existência e intensidade de correlação entre os atributos químicos após os tratamentos com os atributos químicos e físicos da condição inicial, foi realizada a análise de correlação canônica (ACC). Devido a elevada variação nos resultados da ACC o teste de dimensões canônicas (tabela 8) incluiu o teste de dimensionalidade e os coeficientes de correlação. O coeficiente de correlação canônica no

eixo 1 foi 0,393, esse valor explicou 75% da variância e foi significativa a 5% de probabilidade.

Tabela 7. Teste de dimensionalidade canônica para atributos químicos e físicos do solo antes e após três anos de irrigação com água residuária tratada em uma Antropossolo Decápico em região semiárida.

Eixo	R	iR	F	nDF	dDF	p
1	0.39364	0.75076	1.47790	30	432.15	0.05231*
2	0.28335	0.88842	1.00216	18	296.00	0.45704
3	0.18447	0.96597	0.65613	8	149.00	0.72928

*significativo ao nível de 5% de probabilidade; R, correlação canônica, iR, variância explicada; DF, graus de liberdade.

Na figura 4, a ordenação dos atributos se dá pela importância relativa de cada parâmetro ilustrada na figura pela proximidade correspondente entre cada variável no gráfico. Quanto mais próximas as variáveis estiverem, mais inter-relacionadas são estas umas das outras. É possível observar associação entre os atributos MOS, P e P orgânico eixo 1 com o P orgânico, P e MOS da condição inicial.

Tabela 8. Coeficientes de correlação canônica padronizados para atributos químicos e físicos do solo antes e após três anos de irrigação com água residuária tratada em uma Antropossolo Decápico em região semiárida.

Variáveis	Eixos		
	1	2	3
P	-0,241	-0,107	0,978
P orgânico	-0,055	0,758	-0,308
MOS	-0,048	0,1183	-0,208
pH	0,110	-0,124	0,068
areia	0,829	0,253	1,108
silte	0,611	0,679	0,791
argila	0,330	0,009	0,780
Ds	4,261	1,623	-4
Dtf	-3,481	-1	3,293
FG	-2,286	-0,036	1,353
P (f)	0,632	1,219	0,505
MOS (f)	-1,377	-0,499	-0,192
pH (f)	0,158	0,398	-0,919

(f) atributo avaliado após três anos de irrigação com água residuária.

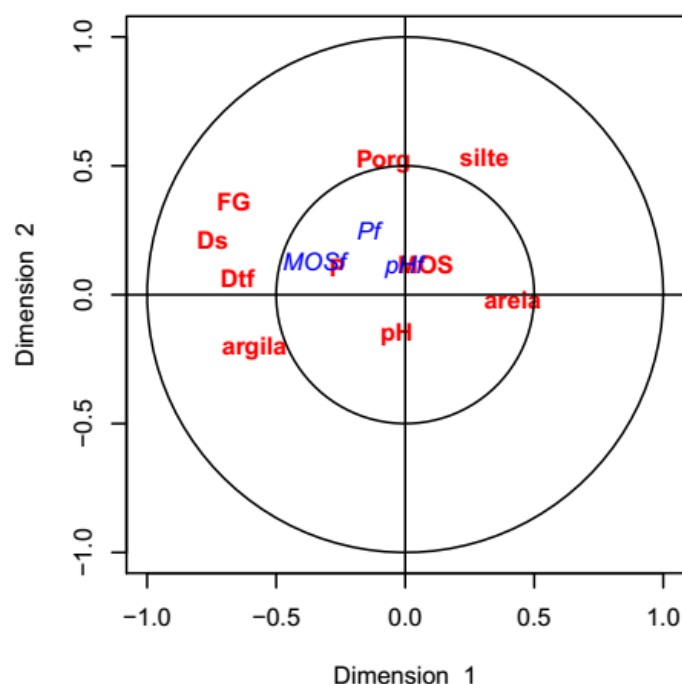


Figura 4. Ordenação da análise de correlação canônica para atributos químicos e físicos do solo antes e após três anos de irrigação com água residuária tratada em uma Antropossolo Decápico em região semiárida.

A associação entre os atributos MOS, P e P orgânico eixo 1 com o P orgânico, P e MOS da condição inicial demonstra a importância da MOS, que por suas características, aumenta a capacidade de retenção e armazenamento de água e nutrientes como P (CAOVILLA et al, 2010). Devido a menor adsorção de P no solo, por sua textura franco arenosa o aumento nos teores de P constatados nessa pesquisa, está associado ao aumento da MOS que promoveu maior adsorção do P nas profundidades estudadas evitando a perda por lixiviação em função da textura do solo mais arenosa.

4.3.5 Crescimento das espécies florestais

As variáveis de crescimento, altura e diâmetro a altura do peito (DAP), das espécies florestais não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos com água residuária e água de abastecimento (tabela 9). Por se tratar de espécies com características fenológicas diferentes, não foi realizada análise comparativa entre as espécies.

Tabela 9. Análise de variância de variáveis de crescimento de espécies florestais da caatinga irrigadas com água de abastecimento e água residuária em Antropossolo Decapítico.

FV	GL	SQ	QM	F	p
Altura (m)					
Bloco	3	2,982	0,994	3,24	0,023*
Tratamento	2	0,422	0,211	0,69	0,502 ^{ns}
Resíduo	216	177,87	0,823		
d.a.p. (mm)					
Bloco	3	656,54	218,8	4,12	0,007*
Tratamento	2	167,19	83,59	1,58	0,210 ^{ns}
Resíduo	158	8382	53,05		

FV, fonte de variação, GL, graus de liberdade; SQ, soma dos quadrados, QM, quadrado médio, F, teste F; p, valor p.

Apesar de não diferirem estatisticamente, as espécies aroeira, freijó e ipe-roxo apresentaram valores médio de altura superiores quando submetidas ao tratamento com aplicação de água residuária. Uma característica comum a essas espécies é o porte que pode atingir, variando dos 15 aos 30 metros quando adultas (MAIA, 2012). Apesar de ser considerada espécies pioneiras, apresentam crescimento lento a moderado, sendo recomendado seu plantio em solos sem vegetação, associado a espécies pioneiras de crescimento rápido.

Tabela 9. Variáveis de crescimento de espécies florestais da caatinga irrigadas com água de abastecimento e água residuária em Antropossolo Decapítico.

Espécie	Variável	Água abastecimento	Água Residuária Tratada	
		7 L semana ⁻¹	7 L semana ⁻¹	14 L semana ⁻¹
Aroeira	Altura (m)	2,09 ± 0,74	2,01 ± 0,72	2,38 ± 0,65
	DAP (mm)	20,3 ± 8,44	17,4 ± 10,8	22 ± 9,48
Brauna	Altura (m)	1,14 ± 0,31	0,89 ± 0,57	1,13 ± 0,41
	DAP (mm)	6,50 ± 1,91	-	7,4 ± 2,7
Catingueira	Altura (m)	1,58 ± 0,71	1,49 ± 0,71	1,59 ± 0,76
	DAP (mm)	10,6 ± 5,37	8,4 ± 2,71	8,6 ± 3,62
Freijo	Altura (m)	2,19 ± 0,77	2,42 ± 0,72	2,61 ± 0,61
	DAP (mm)	11,4 ± 3,90	13 ± 5,12	13 ± 3,97
Ipe-roxo	Altura (m)	2,81 ± 0,80	2,82 ± 0,69	2,88 ± 0,89
	DAP (mm)	17,0 ± 6,15	17 ± 3,42	17 ± 5,89

Alguns autores verificaram crescimento significativo de espécies florestais pioneiras em resposta a longos períodos de irrigação com água residuária. Avaliando o efeito de corretivos no crescimento de espécies florestais em solo degradado, Souza et al, (2012) relataram resposta positiva de aroeira e catingueira a aplicação aos tratamentos que aumentaram os atributos químicos do solo mesmo com a salinidade elevada. Destacando a

importância de selecionar espécies com tolerância à salinidade e sodicidade, mais adequadas quando se tem um nível de salinidade e/ou sodicidade mais acentuado (QADIR et al., 2007).

Lemos et al (2014) correlacionaram fatores edáficos e climáticos com as características da vegetação, e assim como Rodal (1984) e Santos et al. (1992), verificaram que as espécies florestais responderam a fatores físicos e químicos do solo, apresentando diferenças de porte, densidade de plantas e espécies presentes, indicando que as diferenças de solo se refletiram na vegetação.

4.4 CONCLUSÃO

A utilização de água residuária de esgotos domésticos tratados mostrou-se uma alternativa promissora de baixo custo para a recuperação da capacidade produtiva do solo pelo incremento elevado nos teores de matéria orgânica e fósforo do solo.

As lâminas de 7 e 14 L semana⁻¹ de água residuária tratada não promoveram diferenças no crescimento em altura e diâmetro (d.a.p) das espécies florestais: Aroeira, Braúna, Catingueira, Freijó e Ipê-roxo peito em apenas três anos de irrigação.

4.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DOETTERL, S; BERHE, A. A; NADEU, E; WANG, Z; SOMMER, Z; FIENER, P. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. **Earth-Science Reviews**. 145, p.102-122. 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS-FAO. **A new framework for conservation-effective land management and desertification control in Latin America and the Caribbean Guidelines for the preparation and implementation of National Action Programmes**. Rome, FAO, 1998.

MEYER, M. F; SANTOS, E. N; PONTES, J. C; NASCIMENTO, P. H. M; ALMEIDA, L. E. S. Avaliação de viabilidade ambiental, técnica e econômica da atividade de extração de argila no município de Campina Grande-PB. **Rev. Bras. Minas**, 12, 186-195, 2014.

SANTOS, L. M. S; TAVARES, V. M. M; MEYER, M. F. **Avaliação de viabilidade ambiental, técnica e econômica da atividade de extração de cascalho no município de Arês – RN**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. 2015.

BECERRA-CASTRO, C. et al. Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. **Environment International**, v. 75, p. 117–135, 2015.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. p. 388–393, 2015.

MONTE, H. M.; ALBUQUERQUE, A. **Reutilização de águas residuais**. Guia Técnico, n. 14. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. 2010, 339 p.

MATEO-SAGASTA, J.; MEDLICOTT, K.; QADIR, M.; RASCHID-SALLY, LIQA; DRECHSEL, PAY. **Proceedings of the UN-Water Project on the Safe Use of Wastewater in Agriculture**. Bonn, Germany: UN-Water Decade Programme on Capacity Development (UNW-DPC). 2013. (UNW-DPC Proceedings Series No. 11)

WINPENNY, J. et al. **The wealth of waste: the economics of wastewater use in agriculture**. FAO Water Reports. Roma. 2010.

DICKIN SK, SCHUSTER-WALLACE CJ, QADIR M, PIZZACALLA K. A review of health risks and pathways for exposure to wastewater use in agriculture. **Environ Health Perspect** 124:900–909, 2016.

MIZYED, N. R. Challenges to treated wastewater reuse in arid and semi-arid areas. **Environmental Science and Policy**. 25, 186-195, 2016.

ELGALLAL M., FLETCHER L., EWANS B. Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review. **Agricultural Water Management**.177: 419-431, 2016.

MEDEIROS, S.S.; SOARES, A.A.; FERREIRA, P.A.; SOUZA, J.A.A.; SOUZA, J.A.; MATOS, A.T. Comportamento dos atributos químicos do solo em resposta à aplicação de água residuária de origem doméstica. **Rev. Bras. Eng. Agr Amb.**, Campina Grande, PB, v.9, (Suplemento), p.268-273, 2005.

ANAMI, M. H.; SAMPAIO, S. C.; SUSZEK, M.; GOMES, S. D.; QUEIROZ, M. M. F. Deslocamento miscível de nitrato e fosfato proveniente de água residuária da suinocultura em colunas de solo. **Agriambi**, v.12, p.75-80, 2008.

CARVALHO, R. S.; SANTOS FILHO, J. S.; SANTANA, L. O. G. ; GOMES, D. A.; MENDONÇA, L. C.; FACCIOLI, G. G. Influência do reuso de águas residuárias na qualidade microbiológica do girassol destinado à alimentação animal). **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 2, p. 157-167, 2013.

KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. Fósforo: de nutriente à poluente! **Rev. Elet. Gestão, Educ. Tecn. Ambie.** v.8, nº 8, p. 1713-1721, set-dez, 2012.

SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. **Matéria orgânica do solo no bioma caatinga**. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p.419-441.

BERTOL, O. J. **Conservação de Solos e Água**. Curitiba: CREA-PR, Série Cadernos Técnicos de Agenda Parlamentar, 2011, 28 p.

GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; OLIVEIRA, F. F. Acumulação de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.99-105, 2008.

GALVÃO, S. R. S; SALCEDO, I. H. Soil Phosphorus Fractions in Sandy Soils Amended with Cattle Manure for Long Periods. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 33, p.613-622, 2009.

SOLOMON, D.; FRITZSCHE, F.; LEHMANN, J.; TEKALIGN, M. & ZECH, W. Soil organic matter dynamics in the subhumid agroecosystems of the Ethiopian Highlands: Evidence from natural ¹³C abundance and particle-size fractionation. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 66:969-978, 2002.

SANTOS, J.Z.L.; NETO, A.E.F.; RESENDE, A.V.de.; CURI, N. CARNEIRO, L.F. COSTA, S.E.V.G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfato em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **R. Bra.Ci.Solo**, v.32, p.705-714, 2008.

KÖEPPEN, W. Klassifikation der klimate nach temperatura, niederschlag und jahreslauf. **Pet. Geo. Mitt.** Gotha, v. 64, p. 193-203, 1918.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba**. Boletim 15, Série Pedologia, 8, Rio de Janeiro: 1972.

DONAGEMA, G. K. **Manual de métodos de análises de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

APHA. AWWA. WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 15 ed. Washington, DC.. American Public Health Association. American Water Works Association, Water Pollution control Federation, 1134p. 1998.

SCHULTE, E. E.; J.B. PETERS; P.R. HODGSON. **Wisconsin Procedures for soil testing, plant analysis and fud & forage analysis**. Department of soil Science. University of Wisconsin-Extension, Madison, WI, 1987. 9p.

MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chim. Acta**, 27:31-36, 1962.

SAUNDERS, W.M.H. e E.G. WILLIAMS, Observation on the determination of total organic phosphorus in soils. **J. Soil Sci.**, 6(6): 254-267, 1955.

SAS INSTITUTE INC. **SAS/STAT® University Edition**, User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc, 2016.

R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2016.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 153p, 1999.

DUARTE, A. S.; AIROLDI, R.P.S.; FOLEGATTI, M. V.; BOTREL, T. A.; SOARES, T. M. Efeitos da aplicação de efluente tratado no solo: pH, matéria orgânica, fósforo e potássio. **R. Bra. Eng. Agr. Amb.**, Campina Grande, v.12, n.3, p.302-310, 2008.

BOLZANI, H. R, OLIVEIRA, D. L. O, LAUTENSCHLAGER, S. R.. Efeito da aplicação de água residuária de suinocultura no solo e na qualidade dos seus lixiviados. **Eng Sanit Ambient.**; 17(4): 385-392, 2012.

SIMONETE, M.A. **Alterações nas propriedades químicas de um Argissolo adubado com lodo de esgoto e desenvolvimento e acúmulo de nutrientes em plantas de milho**. 2001. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

FALKINER, R. A.; SMITH, C. J. Changes in soil chemistry in effluent-irrigated Pinus radiata and Eucalyptus grandis. **Australian J. Soil Research**, v.35, p.131-147, 1997.

PRIMAVESI, O.; ARZABE, C.; PEDREIRA, M. dos S. **Mudanças climáticas: visão tropical integrada das causas, dos impactos e de possíveis soluções para ambientes rurais ou urbanos**. Embrapa Pecuária Sudeste : São Carlos, 2007.

- MATOS, A.T.; FONTES, M.P.F.; JORDÃO, C.P. & COSTA, L.M. Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em Latossolo Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, 20:379-386, 2003
- CAOVILLA, F. A., SAMPAIO, S. C., SMANHOTTO, A., NÓBREGA, L. H. P., QUEIROZ, M. M. F., GOMES, B. M.. Características químicas de solo cultivado com soja e irrigado com água residuária da suinocultura. **R. Bras. Eng. Agr. Ambiental**, 14(7), 692-697, 2010.
- OLATUYI, S. O.; AKINREMI, O. O.; FLATEN, D. N. CROW, G. H. Accompanying cations and anions affect the diffusive transport of phosphate in a model calcareous soil system. **Canadian J. Soil Sci.**, v. 89, p. 179-188, 2009.
- VITTI, G.C.; BOARETTO, A.E.; Pentead, S.R. **Fertilizantes e fertirrigação**. In: Fertilizantes fluídos. Piracicaba: Potafos, 1994. 343p
- COELHO, A.M., ALVES, V.M.C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, Potafos, 2004. p.243-283.
- ARAÚJO, C.; RUIZ, H.; SILVA, D.; FERREIRA, P.; ALVAREZ, V.; BAHIA, A. Eluição de fósforo em relação ao tempo de difusão em colunas com agregados de um Latossolo vermelho distrófico. **R. Bra. Eng. Ag. Ambiental**. v.7, n.1, p.24-30, 2003.
- HEATHWAITE, L.; SHARPLEY, A.; GBUREK, W.A. A conceptual approach for integrating phosphorus and nitrogen management at watershed scales. **Journal of Environmental Quality**, v.23, n.2, p.337-343, 2000.
- MOHAMMAD, M.J.; MAZAHREH, N. Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, 1281-1294, 2003.
- FALKINER, R.A.; POLGLASE, P.J. Transport of phosphorus through soil in an effluent-irrigated tree plantation. **Australian Journal of Soil Research**, v.35, p.385-397, 1997.
- JOHNS, G. G.; MCCONCHIE, D. M. Irrigation of bananas with secondary treated sewage effluent. II. Effect on plant nutrients, additional elements and pesticide residues in plants, soil and leachate using drainage lysimeters. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.45, p.1619-1638, 1994.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo é um dos recursos naturais mais importantes para a manutenção da qualidade de vida na terra, portanto é fundamental mantermos sua capacidade produtiva, tendo em vista que após a perda desta, a recuperação é lenta, onerosa e em alguns casos, improvável. Dessa forma, as ações empregadas devem envolver estratégias de recuperação de áreas degradadas a curto, médio e longo prazo.

As estratégias em longo prazo visam a recuperação da vegetação pela implantação de espécies pioneiras nativas de uso múltiplo, que possam trazer um retorno econômico e ambiental. A médio prazo a principal estratégia é a implantação de sistemas agroflorestais, nesse sentido o uso de leguminosas se destaca como alternativa para o semiárido, e mais recentemente tem-se dado atenção ao uso de espécies cactáceas como a palma forrageira associada a espécies florestais nativas. Entretanto para áreas em acentuado estágio de degradação que necessitam de atenção imediata, as estratégias atuais envolvem a adubação e correção do solo, que no semiárido torna-se inviável com uso de fertilizantes, levantando a necessidade de práticas alternativas como o uso de adubos verdes e fontes orgânicas, menos onerosos e eficientes.

Embora ainda sejam poucas as pesquisas publicadas com o reuso de água, efetivamente pode ser considerada uma alternativa a curto prazo para a recuperação de áreas degradadas no semiárido pelo aporte de nutrientes e matéria orgânica ao solo. Esse é um campo de estudos ainda carente da atenção de pesquisadores a fim de reduzir a escassez hídrica e promover o reaproveitamento dos efluentes domésticos de forma a evitar contaminação do solo e possibilitar a recuperação da capacidade produtiva dos solos degradados no semiárido.

O fato das espécies florestais, não terem apresentado respostas em função dos tratamentos com água residuária destaca a necessidade de estudos adicionais para aperfeiçoamento do uso de água residuária tratada na irrigação de espécies florestais nativas da caatinga, como por exemplo a seleção de espécies mais responsivas a irrigação com água residuária, a determinação da época, frequência e volume de água a ser aplicado, a definição de espaçamentos e consórcios entre espécies visando o melhor aproveitamento dos recursos hídricos a fim de potencializar os efeitos da irrigação com água residuária..

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-OMRAN, A. M; AL-WABEL, M.I; NADEEM, M. F; AL-SHARANI, S. Spatial variability for some properties of the wastewater irrigated soils. **Jour. Saudi. Soc. Agri. Sci**, 12, p. 167-175, 2013.
- ANAMI, M. H.; SAMPAIO, S. C.; SUSZEK, M.; GOMES, S. D.; QUEIROZ, M. M. F. Deslocamento miscível de nitrato e fosfato proveniente de água residuária da suinocultura em colunas de solo. **Agriambi**, v.12, p.75-80, 2008.
- ANDRADE, A. R. S. de et al. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 322-329, 2015.
- AQUINO, R. E; MARQUES JUNIOR, J. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. **Pesq. Agropec. Trop**. V.44, n.1, p. 32-41, 2014.
- ARAÚJO, E; KER, J.; NEVES, J.; LANI, J. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Rev. Bras. Tec. Aplic.Ci. Agrárias**, vol. 5: 187-206, 2012.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 153p, 1999.
- BABALOLA, O; LAL, R. Subsoil gravel horizon and maize root growth: Gravel concentration and bulk density effects. **Plant and soil**, 46, 337-346, 1977.
- BEEKMAN, G. B. **Qualidade e conservação da água**. In: Encontro Nacional De Assistência Técnica e Extensão Rural, Brasília. Conferência. Brasília: Associação Brasileira das Entidades de Assistência Técnica e Extensão Rural, 1996.
- BECERRA-CASTRO, C. et al. Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. **Environment International**, v. 75, p. 117–135, 2015.
- BENITES, V. M; MACHADO, P. L. O. A; FIDALGO, E. C. C; COELHO, M. R; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, 139, p. 90-97, 2007.
- BERTOL, O. J. **Conservação de Solos e Água**. Curitiba: CREA-PR, Série Cadernos Técnicos de Agenda Parlamentar, 2011, 28 p.
- BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. p. 388–393, 2015.
- BONO, J. A. M.; MACEDO, M. C. M.; TORMENA, C. A.; NANNI, M. R.; GOMES, E. P.; MÜLLER, M. M. L. Infiltração de água no solo em um Latossolo Vermelho da região sudoeste dos Cerrados com diferentes sistemas de uso e manejo. **Rev. Bras .Ci. Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, 2012.

BORGHETTI, N.; BORGHETTI, J. R.; ROSA, E.F.F. **Aquífero Guarani – A verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 2004.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Rev. Ci. Agronom.** V. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

BRANDÃO, V. S. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: Editora da UFV, 2006. 120 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba**. Boletim 15, Série Pedologia, 8, Rio de Janeiro: 1972.

BREGA FILHO, D. & MANCUSO, P. C. S. **Conceito de reuso de água**. In: **Reuso de água**; Capítulo 2. Eds. P. C. Sanches Mancuso & H. Felício dos Santos. Universidade de São Paulo – Faculdade de Saúde Pública, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. São Paulo, 2002.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Sci. Soc. Ame. Jour.**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, R. S.; SANTOS FILHO, J. S.; SANTANA, L. O. G. ; GOMES, D. A.; MENDONÇA, L. C.; FACCIOLI, G. G. Influência do reuso de águas residuárias na qualidade microbiológica do girassol destinado à alimentação animal). **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 2, p. 157-167, 2013.

CAMPOS M. C. C, MARQUES JÚNIOR J, PEREIRA G. T, SOUZA Z. M; BARBIERI D. M. Aplicação de adubo e corretivo após o corte da cana-planta utilizando técnicas Geoestatísticas, **Ciência Rural**, 38:974-980, 2008.

CAVALCANTE, E. G. S; ALVES, M. C; SOUZA, Z. M; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 31, p. 1329-1339, 2007.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial de cobre e manganês em Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Rev. Ci. Agronômica**, v.40, p.211-218, 2009.

CRUZ, C. L; VASCONCELOS, A. C. F; OLIVEIRA, J. R. Situação de Impacto Ambiental: um estudo em uma Indústria de Extração Mineral. **Qualitas Revista Eletrônica**, v. 15, n. 2, 2014.

CORÁ, J. E.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v.26, p.374-387, 2006.

CHRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo”, **ITEM** n.49, pp.8-13, 2001.

CURCIO, G. R.; LIMA, V. C.; GIAROLA, N. F. B. **Antropossolos: Proposta de Ordem (1ª aproximação)**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2004.

DICKIN SK, SCHUSTER-WALLACE CJ, QADIR M, PIZZACALLA K. A review of health risks and pathways for exposure to wastewater use in agriculture. **Environ Health Perspect** 124:900–909, 2016.

DOETTERL, S; BERHE, A. A; NADEU, E; WANG, Z; SOMMER, Z; FIENER, P. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. **Earth-Science Reviews**, 2016. 145, p.102-122.

DUARTE, R. **Do desastre natural à calamidade pública: a seca de 1998-1999**. Recife, Fundação Joaquim Nabuco, 144p. 2002. (Série Estudos sobre as Secas do Nordeste, vol. 5)

ELGALLAL M., FLETCHER L., EWANS B. Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review. **Agricultural Water Management**.177: 419-431, 2016.

ERTHAL, V. J. T.; FERREIRA, P. A.; PEREIRA, O. G.; MATOS, A. T. Características fisiológicas, nutricionais e rendimento de forrageiras fertirrigadas com água residuária de bovinocultura. **Rev. Bras. Eng. Ag. Amb.**, Campina Grande, v. 14, n. 5, p. 458 - 466, 2010.

FERREIRA, D.G.; MELO, H.P.; NETO, F.R.R.; NASCIMENTO, P.J.S.; RODRIGUES, V. **Avaliação do quadro da desertificação no Nordeste do Brasil: diagnósticos e perspectivas**. Anais da Conferência Nacional da Desertificação, Fortaleza, 1994. Brasília, Fundação Esquel Brasil. p.7-55. 1994.

FONSECA, G. C.; CARNEIRO, M. A. C.; COSTA, A. R.; OLIVEIRA, G. C.; BALBINO, L. C. Atributos físicos, químicos e biológicos de latossolo vermelho distrófico de cerrado sob duas rotações de cultura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 1, p. 22-30, 2007.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS-FAO. **A new framework for conservation-effective land management and desertification control in Latin America and the Caribbean Guidelines for the preparation and implementation of National Action Programmes**. Rome, FAO, 1998.

GALVÃO, A.L.C.O. **Caracterização geoambiental em região submetida aos processos de desertificação -Gilbúes – PI**, um estudo de caso. Anais da Conferência Nacional da Desertificação, Fortaleza, 1994. Brasília, Fundação Esquel Brasil. p.79-167. 1994

GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; OLIVEIRA, F. F. Acumulação de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.99-105, 2008.

- GALVÃO, S. R. S; SALCEDO, I. H. Soil Phosphorus Fractions in Sandy Soils Amended with Cattle Manure for Long Periods. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 33, p.613-622, 2009.
- GRÄLER, B., PEBESMA, E., HEUVELINK, G. Spatio-Temporal Interpolation using gstat. **The R Journal**, 8(1), 204-218, 2016.
- HAN, Y., ZHANG, J., MATTSON, K. G., ZHANG, W. WEBER, T. A. Sample Sizes to Control Error Estimates in Determining Soil Bulk Density in California Forest Soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 80:756–764, 2016.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Indicadores de desenvolvimento sustentável: Brasil 2004. Rio de Janeiro, IBGE.393p. 2004.
- KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. Fósforo: de nutriente à poluente! **Rev. Elet. Gestão, Educ. Tecn. Ambie.** v.8, nº 8, p. 1713-1721, set-dez, 2012.
- KUMAR, S. Estimating spatial distribution of soil organic carbon for the Midwestern United States Using historical database. **Chemosphere**, 127, p. 49-57, 2015.
- LEITE, F.R.B.; OLIVEIRA, S.B.P.; BARRETO, M.M.S.; CARVALHO, G.M.B.S.; FREITAS FILHO, M.R. **Degradação ambiental e susceptibilidade aos processos de desertificação na região do Médio Jaguaribe – CE.** Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, 2003. INPE, p.1315-1322. 2003.
- MARCOLIN, C.D. & KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Sci. Agron.**, 33:349-354, 2011.
- MATALLO JÚNIOR, H. **Indicadores de desertificação: histórico e perspectivas.** Brasília, UNESCO. 126p. 2001.
- MATEO-SAGASTA, J.; MEDLICOTT, K.; QADIR, M.; RASCHID-SALLY, LIQA; DRECHSEL, PAY. **Proceedings of the UN-Water Project on the Safe Use of Wastewater in Agriculture.** Bonn, Germany: UN-Water Decade Programme on Capacity Development (UNW-DPC). 2013. (UNW-DPC Proceedings Series No. 11)
- MEDEIROS, S.S.; SOARES, A.A.; FERREIRA, P.A.; SOUZA, J.A.A.; SOUZA, J.A.; MATOS, A.T. Comportamento dos atributos químicos do solo em resposta à aplicação de água residuária de origem doméstica. **Rev. Bras. Eng. Agr Amb.**, Campina Grande, PB, v.9, (Suplemento), p.268-273, 2005.
- MEDEIROS, S. S. DE; GHEYI, H.R.; PÉREZ-MARIN, A.M.; SOARES, F.A.L.; FERNANDES, P.D. Características químicas do solo sob algodoeiro em área que recebeu água residuária da suinocultura. **R. Bras. Ci. Solo**, 35:1047-1055, 2011
- MEYER, M. F; SANTOS, E. N; PONTES, J. C; NASCIMENTO, P. H. M; ALMEIDA, L. E. S. Avaliação de viabilidade ambiental, técnica e econômica da atividade de extração de argila no município de Campina Grande-PB. **Rev. Bras. Minas**, 12, 186-195, 2014.

MIZYED, N. R. Challenges to treated wastewater reuse in arid and semi-arid areas. **Enviromental Science and Policy**. 25, 186-195, 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Convenção das Nações Unidas de combate à desertificação nos países afetados por seca grave e/ou desertificação, particularmente na África**. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. 89p. s/d 1

MONTE, H. M.; ALBUQUERQUE, A. **Reutilização de águas residuais**. Guia Técnico, n. 14. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. 2010, 339 p.

MONTENEGRO, A. A. A.; ABRANTES, J. R. C. B.; LIMA, J. L. M. P.; SINHGH, V. P.; SANTOS, T. E. M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. **Catena**, Amsterdam, v.109, p. 139-149, 2013.

NAGARAJA, M. S., SRINIVASAMURTHY, C. A.: Soil fertility in physically degraded soils: Are we over estimating?, **Curr. Sci. India**, 97, 1534–1536, 2009

NAGARAJA, M. S., BHARDWAJ, A. K., REDDY, G. V. P., SRINIVASAMURTHY, C. A., KUMAR, S.: Estimations of soil fertility in physically degraded agricultural soils through selective accounting of fine earth and gravel fractions, **Solid Earth**, 7, 897-903, 2016.

NASCIMENTO, A. R. V. J. Atributos físicos e químicos de áreas degradadas pela mineração de scheelita na região tropical semiárida. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. 90p.

NEGREIROS NETO, J. V.; SANTOS, A. C.; GUARNIERI, A.; SOUZA, D. J. A. T.; DARONCH, D. J.; DOTTO, M. A.; ARAÚJO, A. S. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema plantio direto. **Semina**, v.35, n. 1, p. 193-204, 2014.

PONTELLI, C.B. **Caracterização da variabilidade espacial das características químicas do solo e da produtividade das culturas utilizando as ferramentas da agricultura de precisão**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2006. 112p.

PRIMAVESI, O.; ARZABE, C.; PEDREIRA, M. dos S. **Mudanças climáticas: visão tropical integrada das causas, dos impactos e de possíveis soluções para ambientes rurais ou urbanos**. Embrapa Pecuária Sudeste : São Carlos, 2007.

RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A.; RITCHIE, J.C.; SOBECKI, T.M. & BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, 116:61-76, 2003.

- REICHERT, J. M; SUZUKI, L. E. A. S; REINERT, D. J; HORN, R. HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & tillage research**, 102, p. 242-254, 2009.
- REINERT, D. J; ALBUQUERQUE, J. A; REICHERT, J. M; AITA, C; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, 32:1805-1816, 2008.
- RODRIGUES, V.; MATALLO JÚNIOR, H.; LINHARES, M.C.; GALVÃO, A.L.C.; GORGÔNIO, A.S. **Avaliação do quadro de desertificação no Nordeste do Brasil: diagnóstico e perspectivas**. In Gomes, G.M.; Souza, H.R.; Magalhães, A.R. Desenvolvimento sustentável no Nordeste. Brasília, IPEA. 1995.
- SALES, M.C.L. **Estudo da degradação ambiental em Gilbués – PI**. Reavaliando o “núcleo de desertificação”. São Paulo, USP. Dissertação de Mestrado. 181p. 1996
- SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. **Matéria orgânica do solo no bioma caatinga**. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p.419-441.
- SAMPAIO, E.V.S.B.; SAMPAIO, Y.; VITAL, T.; ARAÚJO, M.S.B.; SAMPAIO, G.R. **Desertificação no Brasil**. Recife, Editora Universitária, 202p. 2003.
- SAMPAIO, E.V.S.B.; ARAÚJO, M.S.B. & SAMPAIO, Y.S.B. Impactos ambientais da agricultura no processo de desertificação no Nordeste do Brasil. **R. Geogr.**, 22:93-117, 2005.
- SANTOS, L. M. S; TAVARES, V. M. M; MEYER, M. F. **Avaliação de viabilidade ambiental, técnica e econômica da atividade de extração de cascalho no município de Arês – RN**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. 2015.
- SAS INSTITUTE INC. **SAS/STAT® University Edition, User’s Guide**. Cary, NC: SAS Institute Inc, 2016.
- SATO, M. K; LIMA, H. V; OLIVEIRA, P. D; RODRIGUES, S. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. **Int. Agrophys**, 29, p. 441-447, 2015.
- SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A.; FIDALSKI, J. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.1369-1377, 2008.
- SCHULTE, E. E.; J.B. PETERS; P.R. HODGSON. **Wisconsin Procedures for soil testing, plant analysis and fud & forage analysis**. Department of soil Science. University of Wisconsin-Extension, Madison, WI, 1987. 9p.
- SECRETARIA ESPECIAL DO MEIO AMBIENTE – SEMA. **Seminário sobre desertificação no Nordeste: documento final**. Brasília, SEMA, 215p. 1986.

SEPASKHAH, A.R.; AHMADI, S.H. & NIKBAKHT SHAHBAZI, A.R. Geostatistical analysis of sortivity for a soil under tilled and no-tilled conditions. **Soil Till. Res.**, 83:237-245, 2005.

SEIDEL E. J, OLIVEIRA M. S. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. **Rev Bras Ci. Solo**. V. 38, p. 699-705. 2014.

SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. **Matéria orgânica do solo**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (eds.) Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.

SILVA, F.M.; SOUZA, Z.M.; FIGUEIREDO, C.A.P.; MARQUES, J.J.; MACHADO, R.V. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.2, p.401-407, 2007.

SOARES, D. B.; NÓBREGA, R. S.; MOTA FILHO, F.O.; PASSOS, C.R. F.; BORGES FILHO, E. F. A. Degradação dos solos por sais em Pernambuco, Brasil. **Rev. Bras. de Geografia Física** v.09, n.05 (2016) 1621-1628.

SOLOMON, D.; FRITZSCHE, F.; LEHMANN, J.; TEKALIGN, M. & ZECH, W. Soil organic matter dynamics in the subhumid agroecosystems of the Ethiopian Highlands: Evidence from natural ¹³C abundance and particle-size fractionation. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 66:969-978, 2002.

SOUZA, Z.M.; BARBIERI, D.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; CAMPOS, M.C.C. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo na aplicação de insumos para cultura da cana-de-açúcar. **Cienc. Agrotec**, 31:371-377, 2007.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Metodologia para identificação dos processos de desertificação; manual de indicadores**. Recife, SUDENE. 18p. 1978.

WINPENNY, J. et al. **The wealth of waste: the economics of wastewater use in agriculture**. FAO Water Reports. Roma. 2010.